

次世代パワー半導体デバイスとその応用技術の動向

佐藤 伸二

1. まえがき

SiCやGaNなどのワイドバンドギャップ(Wide-band-Gap：以下WBGと記す)半導体を用いた次世代パワー半導体デバイスが注目されている。高品質なSiCウエハが実用的なレベルで生産できるようになり、次世代パワー半導体デバイスは量産化もされてきている。特に高性能な次世代パワー半導体デバイスはICSCRM(The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials)などの国際会議で盛んに議論されている。

次世代パワー半導体デバイスおよびその応用は研究段階から実用段階に移行してきた。一般に、これらの新材料半導体は従来のSi半導体と比較して高度なプロセスで作られるため高価になる。このため適用する場合、変換器のコスト上昇は避けられない。普及に対してはコスト上昇以上の付加価値創出が求められる。

本レポートでは注目されている次世代パワー半導体デバイスについて、応用技術の観点から特徴と開発動向を報告する。

2. WBG半導体のポテンシャル

WBG半導体のポテンシャルについて、デバイス/回路/システムに分けて述べる。

2.1. デバイスのポテンシャル

従来からパワー半導体に使われているSiとWBG半導体の物性値の比

表-1 ワイドバンドギャップ半導体材料の物性定数

材 料		ダイヤモンド	GaN	4HSiC	Si
バンドギャップ	(eV)	5.47	3.39	3.26	1.12
絶縁破壊電界強度	(MV/cm)	10	3.3	2.5	0.3
熱伝導度	(W/cmK)	20	2	4.9	1.5

較を表-1に示す⁽¹⁾。

WBG半導体はSiと比較して絶縁破壊電界強度が約1桁高い。これにより、Siに対して耐圧とキャリア量をそれぞれ約1桁上げることができ、キャリア量の増加は導通時の抵抗値(Ron)を下げるので、高耐圧かつ導通損失が小さいパワーデバイスが実現する。また、従来からSi-MOSFETが活用できない高電圧領域もSiC-MOSFETがカバーできるので、ユニポーラデバイスの高速スイッチング特性と低導通損失が両立する。さらにWBG半導体は熱的に励起されるキャリアが少ないため、これを使ったパワーデバイスは高温動作が可能である。例えば1kV耐圧クラスのパワーデバイスにおいて、Siの動作限界温度が200℃程度なのに対して、SiCは1000℃以上と解析されている⁽²⁾。

2.2. 回路のポテンシャル

パワーデバイスの高速スイッチング動作によりスイッチング損失が小さくなり高周波で動作させることが可能になる。高周波スイッチングは、電気的フィルタ(トランスやリアクトル、コンデンサ)の容量を減らし、これらの電気回路部品を大幅に

小型にする。さらに高温動作によって得られる温度差で抜熱が容易になることから、冷却装置の簡約化が行える。これは冷却器を小型にできるだけでなく、水冷が必要な用途が強制空冷に、強制空冷が必要な用途が自然空冷に置き換えることが期待できる。

2.3. システムのポテンシャル

電力変換損失の大幅な低減、すなわち、電力変換効率を大きく向上できる。また、システムを小型化・軽量化により周辺回路のコストダウンが期待できる。

高周波スイッチングは、スイッチングに伴う入出力波形の脈動が抑制されるだけでなく、負荷変動や入力変動に対する高速制御応答が得られることから電力変換器入出力の電力品質も向上する。また、高速な制御応答は、電車や電気自動車に応用す

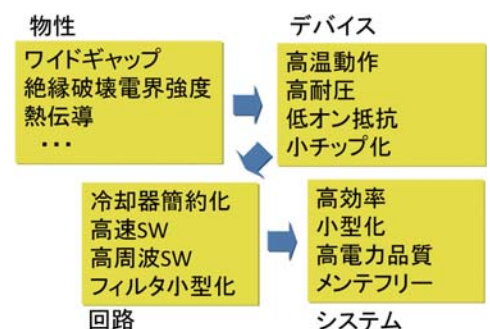


図-1 技術のポテンシャル

るときに回生ブレーキの利用率を上昇させ、エネルギーの回生効率を上げるだけでなく、ブレーキの摩耗低減による寿命を延ばすことが期待される。

これらをまとめたのが図-1である。物性のポテンシャルと回路またはシステムのポテンシャルをつなぐ技術開発が重要になってきている。

3. NEDOプロジェクトでの開発例

従来の変換器に対して、Si-IGBTを単にSiC-MOSFETに置き換えるだけでも、電力変換損失を大幅に低減できる。NEDOプロジェクト⁽³⁾⁽⁴⁾ではSiCを用いた高出力電力密度三相インバータを開発している。試作成果を図-2に示す。同図(A)は比較用のSi-IGBTインバータであり、同図(B)以降はSiCパワーデバイスを用いたインバータである。(B)はSiC置き換えの低損失化により冷却に必要なヒートシンクを大幅に小型化し、4倍の出力電力密度(定格出力電力÷容積で定義、単位はW/cc= kW/dm^3)を達成している。同図(C)以降では、加えて高温動作によるヒートシンクの簡約化と、高周波動作によるフィルタコンデンサの小容量化を行い、さらなる高出力電力密度を行っている。

開発した10kW容量SiCインバータの詳細を図-3に示す。約250ccの容積で誘導電動機を使った10kW実負荷評価も実施している。SiCパワー半導体デバイスはスイッチング損失が少なく50kHzの高周波スイッチング動作を行っているにもかかわらず97%以上の変換効率を達成している。

4. 周辺技術の開発

次世代パワー半導体デバイスに

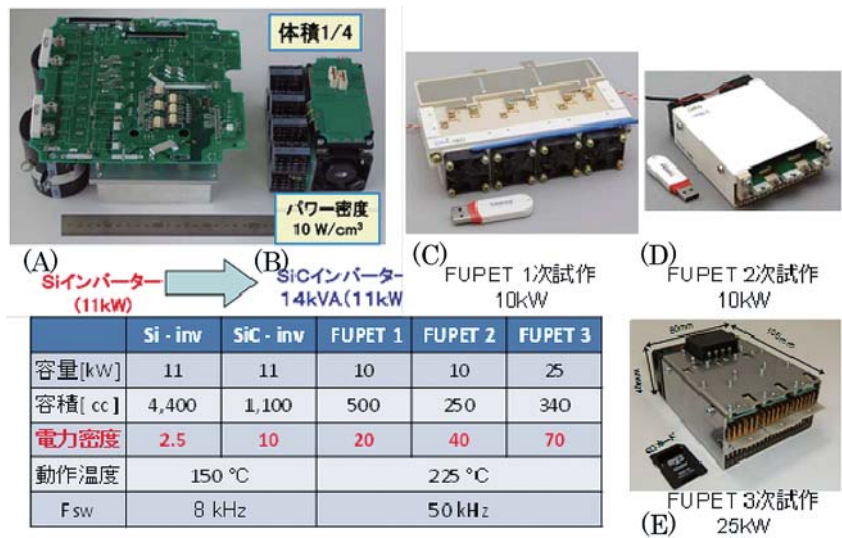
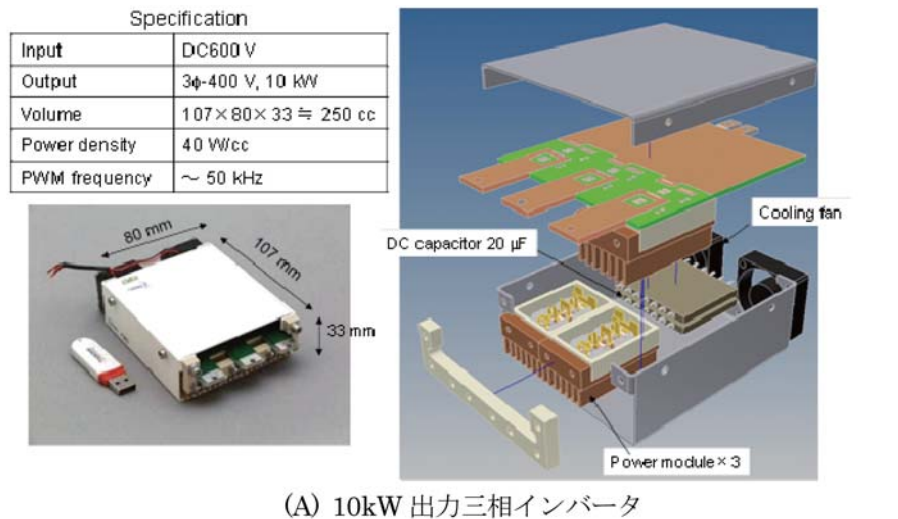
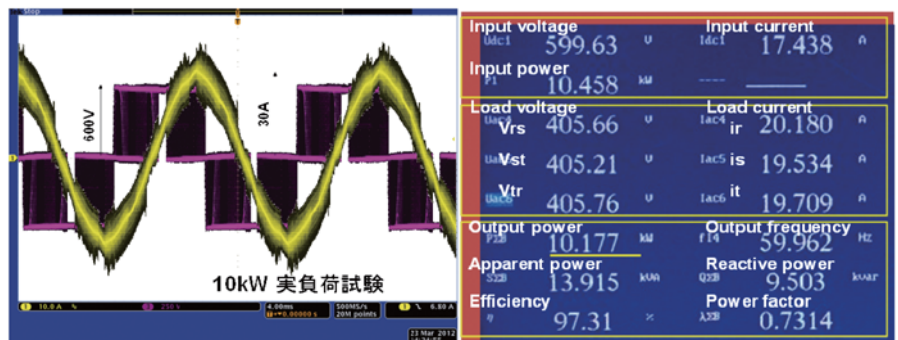


図-2 NEDOプロジェクトにおけるSiCインバータの開発例



(A) 10kW 出力三相インバータ



(B) 出力電圧電流波形

(C) 動作時のパワーメータ表示

図-3 三相PWMインバータの開発例

は、従来のSiデバイスにない以下の特徴がある。

- ・高温動作
- ・高速スイッチング動作
- ・高周波動作

これらの特徴を活用することにより従来にない新しい付加価値を生み出す。このためには、新技術の開発が必要になる。

4.1. 高温動作

前章で述べたとおり、高温動作の活用は、冷却の簡約化によるシステムの大幅な小型軽量化になる。また、Siデバイスが利用できない厳しい高温環境での応用も期待できる。しかし、高温動作はモジュールの信頼性を低下させる。パワーデバイス周辺の構造を図-4に示す。



図-4 パワーデバイス周辺の構造

一般に、パワーデバイスの裏面電極ははんだ、表面電極はワイヤーを用いて回路パターンと接合する。従来、前者には200℃前後の固相線温度を持つはんだが使われている。SiCで200℃を超える高温動作を目標とする場合には固相線温度が300℃以上の接合技術の開発が必要である。

高温動作においては、はんだとCuなどの回路パターンで意図しない金属間化合物を生成、線熱膨張率差と広い動作温度範囲による大きな

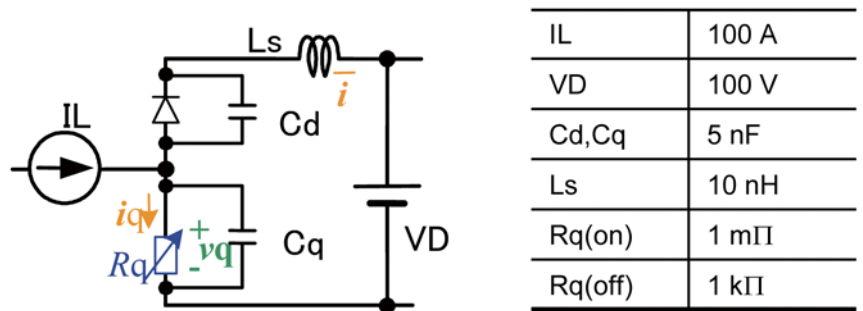
熱変形による機械的応力がある。これらにより長期信頼性が低下する。このため、高温で利用できる接合技術の開発が必要になる。高融点のはんだやシンター接合、拡散接合が開発されてきており、今後の動向が注目される。

また、パワー半導体デバイス周辺にあっても高温に弱い部品が変換機動作温度の上限を抑える。このた

め、高温に対応した部品の開発または周辺部品の冷却技術が求められる。

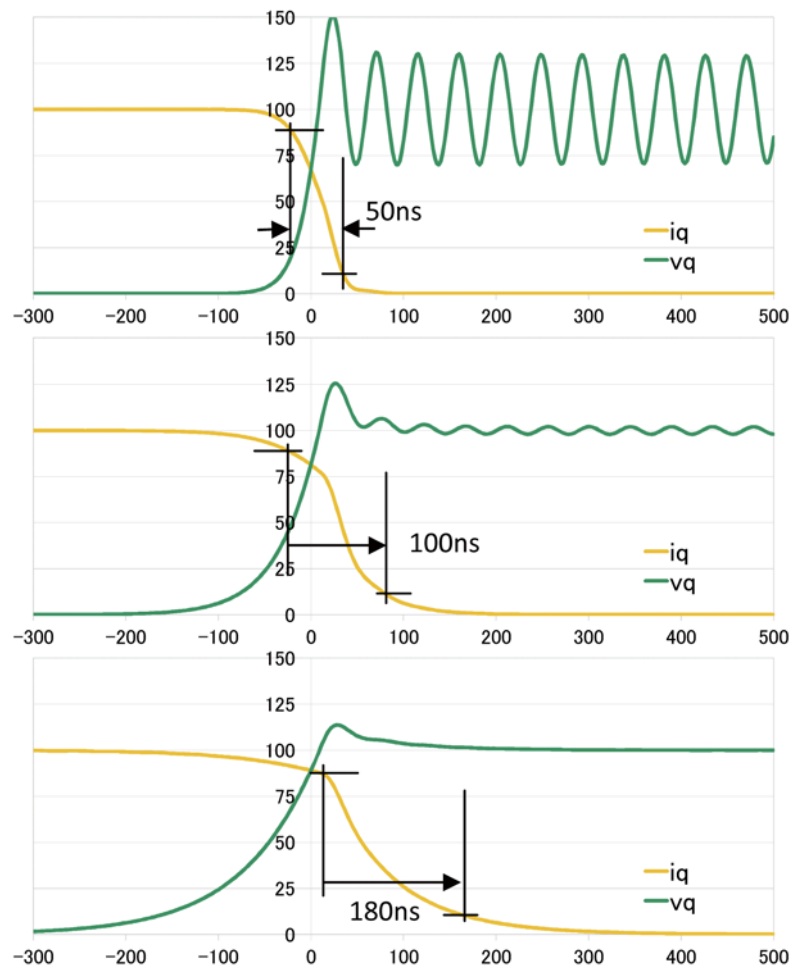
4.2. 高速スイッチング動作

高速スイッチングはスイッチング損失を低減し、変換効率を改善する。しかし、スイッチング時の電圧サージや電圧リングング(回路共振)が生じやすくなる。また、パワーデバイスに発生する大きなdv/dtおよ



IL	100 A
VD	100 V
Cd, Cq	5 nF
Ls	10 nH
Rq(on)	1 mΩ
Rq(off)	1 kΩ

(a) 解析条件



(b) 解析結果

図-5 スwitchングシミュレーション

び di/dt が高周波の漏えい電流などのノイズやサージ電圧の原因となる。制御回路やセンサーなどの誤動作を誘発させることがあるので、ロバストな制御系を組む必要がある。

スイッチング速度と電圧サージの簡易シミュレーションを図-5に示す。スイッチングが高速なほど、サージ電圧とリングングが大きくなる。ただし低速なスイッチングは損失が大きくなる。

サージ電圧やリングングは、回路の浮遊インダクタンスの大きさに大きく依存する。このため、低インダクタンスのパワーモジュールが開発されてきている。ただしモジュール内の浮遊インダクタンスを小さく作っても、モジュールの外にそれより大きな浮遊インダクタンスを持てばサージ電圧が大きくなる。そこで、パワーモジュールの中にスナバ回路を入れる試みも行われている。

スナバ回路の効果を、図-6を用いて説明する。同図で L_S はパワーモジュール内の浮遊インダクタンス、 L_H と L_L はパワーモジュールの外の浮遊インダクタンスである。 Q_2 のターンオフにおいて、過渡的にスナバ回路を介して電流が流れる。このとき、 L_S には大きな di/dt が発生するが、 L_H と L_L の di/dt は小さい。このため、サージ電圧の大きさはモジュール内部のインダクタンス L_S に依存する。すなわち、モジュール外部に浮遊インダクタンス L_H 、 L_L がある程度あってもサージ電圧が大きくなる。さらに、スナバに内蔵される抵抗素子によって、リングングを減衰させる。

スナバ回路を内蔵したパワーモジュールを図-7に示す⁽⁵⁾。また、このモジュールのターンオフ時スイッチング波形を図-8に示す。同図

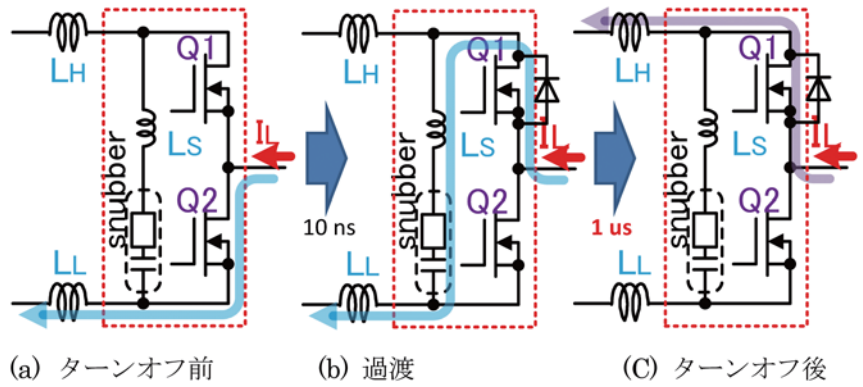


図-6 スナバ回路内蔵パワーモジュールのターンオフ時の電流経路

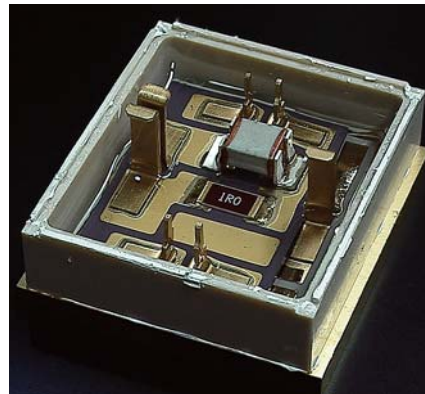
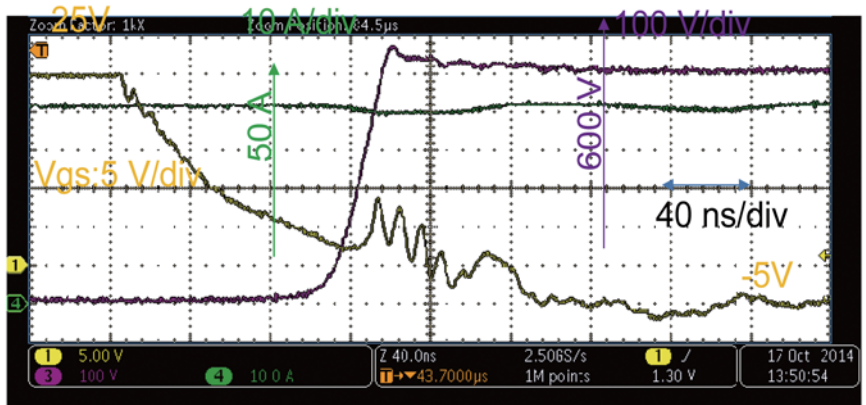
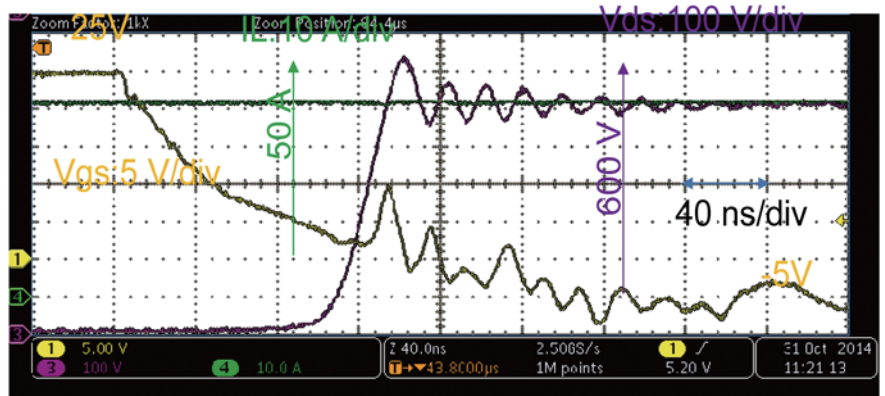


図-7 スナバ内蔵パワーモジュール



(a) スナバ内蔵パワーモジュール



(b) スナバ無しパワーモジュール

図-8 ターンオフ波形

(b)は同一形状でスナバを取りつけていないモジュールの波形である。スナバ回路がある図-8(a)は同図(b)に対して、電圧のオーバーシュートと共振を抑制できている。

4.3. 高周波動作

高周波動作は、電気フィルタが小容量化できる。しかし、スイッチング回数の増加に伴ってEMIノイズが増加する。高周波スイッチングを行うときは、従来以上にノイズ電流の経路を考慮して、悪影響を生じないように心掛けることが重要になる。加えて、鉄損の少ないトランスやリアクトルの選定が高周波動作変換器の高効率化に重要になる。

前章で述べたように、スイッチング周波数の上昇は、制御周期を短くして電力変換器の入出力電力品質の改善につながる。ただし、この性能を活かすためには高性能な制御マイコンやセンサーの開発が必要になる。

5. SiC変換器の開発例

系統安定化用に主スイッチングデバイスにSiC-MOSFETを用いたマトリックスコンバータを紹介する⁽⁶⁾。主回路写真を図-9に示す。同変換器は、再生可能エネルギーによる電力変動を吸収するためのフラ

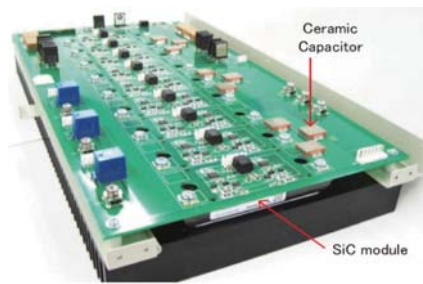


Fig.6 Matrix converter main circuit.

図-9 SiC-MOSFETを用いたマトリックスコンバータ

イホイール蓄電システムに適用し、定周波数の商用電力と可変周波数のフライホイールで双方向に電力を伝送する。電解コンデンサを必要としないマトリックスコンバータ方式であり、SiCの高温動作と高効率特性を利用して自然冷却方式としている。寿命部品となる電解コンデンサや冷却ファンを用いていないため、20年以上の長寿命を達成する。

6. まとめ

システムを次世代パワー半導体デバイスに置き換えるだけでも、高効率化や小型軽量化などの恩恵がある。しかし、単なる置き換えの場合、既存のSiシステムとの競合になり、コスト重視のアプリケーションでは不利となる。

新材料パワー半導体デバイスには、Siにないポテンシャルがたくさ

んあるが、システムに活かしきれていない。これらを活かす応用技術および周辺部品の開発が今後の重要な研究課題になっている。

〈参考文献〉

- (1) 四戸孝、“SiC パワーデバイス”,東芝レビュー Vol.59, No.2, pp.49-53(2004)
- (2) Cyril Buttay, Dominique Planson, Bruno Allard, Dominique Bergogne, Pascal Bevilacqua, Charles Joubert, Mihai Lazar, Christian Martin, Hervé Morel, Dominique Tournier, Christophe Raynaud, “State of the art of High Temperature Power Electronics”, <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/41/33/49/PDF/microtherm09.pdf>
- (3) NEDO「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発プロジェクト」, 2006-2008年度
- (4) NEDO「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト/次世代パワーエレクトロニクス技術開発(グリーンITプロジェクト)」, 2009-2012年度
- (5) NEDO「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」, 2010-2014年度
- (6) 加藤康司、石隈悟、伊東洋一、大沼善也、宮脇慧、伊東淳一、“SiC-MOSFETを用いたマトリックスコンバータによる高効率・長寿命フライホイール蓄電システム”, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 1-12, pp.I-77-82(2015)
(さとうしんじ:サンケン電気(株))