

6.5kVフルSiCパワーモジュール

豊田吉彦* 山川 聡*
西沢昭則* 中田修平**
大井健史*

6.5kV Full-SiC Power Module

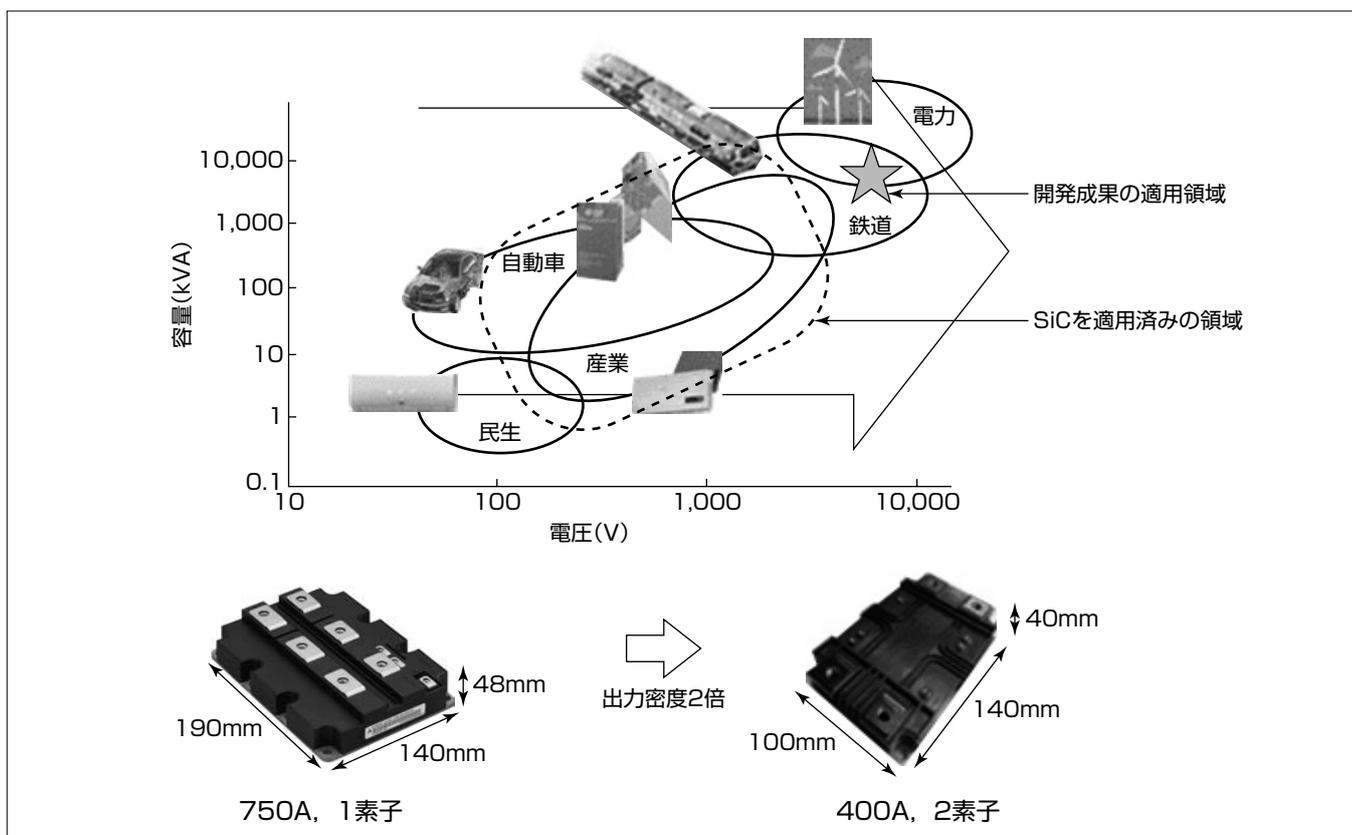
Yoshihiko Toyoda, Akinori Nishizawa, Takeshi Oi, Satoshi Yamakawa, Shuhei Nakata

要 旨

低炭素社会の実現に向けて省エネルギー・省資源化に向けた取組みが世界規模で進められている。低炭素社会の実現には電力の利用効率向上は重要な課題であり、効率よく電力を制御できるパワーデバイスがキーとなっている。半導体材料としてSiC(シリコンカーバイド)を用いることで、パワーデバイスの高効率化が実現できる。三菱電機では、世界に先駆けてSiCパワーデバイスを実装したパワーモジュールを実用化し、その高耐圧化を進めることでSiCの適用分野を広げてきた。

適用分野の更なる拡大に向けて、当社は三菱マテリアル(株)、デンカ(株)、日本ファインセラミックス(株)、DOWAエレクトロニクス(株)と連携し、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業に

よって6.5kVフルSiCパワーモジュールの開発を行っている。パワーモジュールの要素技術として、①高い熱伝導率と温度サイクル信頼性を両立させた絶縁基板、②高い温度サイクル信頼性を持ち、低加圧で接合可能なAg(銀)接合技術、③SBD(Schottky Barrier Diode)を内蔵したデバイス構造を持つ6.5kV MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を開発した。また、これらの要素技術の統合によって、従来のSi(シリコン)パワーモジュールに対して出力密度2倍を達成できる見通しを得た。今後、これらの要素技術を盛り込んだ6.5kV高出力密度フルSiCパワーモジュールを試作し、その性能を実証していく予定である。



6.5kVフルSiCパワーモジュール

SiCの適用分野の更なる拡大に向けて、NEDOの助成事業によって6.5kVフルSiCパワーモジュールの開発を行っている。SiCパワーモジュールは2素子入りで定格電流400A、フットプリント140×100(mm)を想定している。高熱伝導絶縁基板、低加圧Ag接合技術、SBD内蔵SiCデバイスを開発し、従来構造のSiパワーモジュールに対して出力密度2倍の達成に見通しを得た。

*先端技術総合研究所 **同研究所(工博)

1. ま え が き

資源枯渇及び地球温暖化は世界規模での大きな課題となっている。低炭素社会を実現することによってこれらの課題を解決することが可能となるため、省エネルギー・省資源化に向けた取組みが世界規模で進められている。多様なエネルギーの中でも電力は、その融通性ゆえに広く使われており、低炭素社会の実現で電力の利用効率向上は重要な課題と位置付けられる。

パワーデバイスを用いることによって、電力を効率よく制御(直流・交流変換, 周波数制御, 電圧制御等)することが可能となるため、パワーデバイスは家電製品から自動車、産業、鉄道、電力と広い分野で使用されている。低炭素社会の実現に向けて、パワーデバイスが利用される局面は大幅に増加していくと見込まれる。これと同時に、パワーデバイス自体の電力損失低減に対する要求もますます高まると考えられる。

パワーデバイスの半導体材料としては、従来Siが用いられてきた。半導体材料をSiより絶縁破壊電界強度が高いSiCに置き換えることによって、パワーデバイスの電力損失を低減することが可能となるため、SiCパワーデバイスは国内外で盛んに開発されている。

当社は、NEDOの助成を得て、SiCパワーデバイスの開発に継続的に取り組んできた。その成果として、0.6kVのSiCパワーモジュールの実用化を皮切りに、高耐圧化を推進し、最近では3.3kVのフルSiCパワーモジュールを実用化している。

現在、更なる高耐圧化を目指して、NEDO助成事業によって6.5kVのフルSiCパワーモジュールの開発に取り組んでいる。本稿では、その概要について述べる。

2. パワーモジュールの技術動向

パワーモジュールの出力密度を向上させることは、パワーモジュールを搭載する機器の小型化・軽量化に大きく貢献する。このような要求に従い、パワーモジュールでは出力密度を継続して向上させてきた。その結果、図1に示すように、1980年から2000年までの20年間で機器の出力密度は1桁以上向上している。パワーデバイスの出力密度向上はパワー半導体デバイスのサイズを縮小することで進展してきた。サイズ縮小は半導体デバイス内部の電界強度の増加を招くため、既にSi半導体材料の物性で決まる絶縁破壊電界強度によってパワーデバイスのサイズ縮小が律速される領域となり、高出力密度化が限界に達しつつある。

半導体材料であるSiCは、従来のSiに比べて絶縁破壊電界強度が約1桁高いという特長を持っており(表1)、これを用いることで高出力密度化の限界を破ることが可能となる。また、従来のSiでは高電圧に対応するためにIGBT

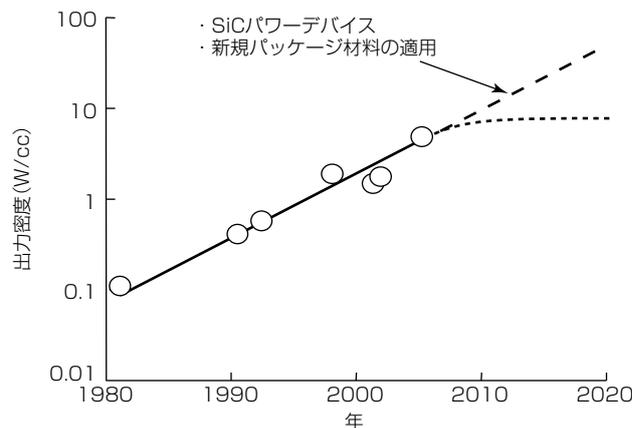


図1. パワーモジュールを搭載した機器の出力密度の変遷⁽¹⁾

表1. SiとSiCの材料物性の比較⁽²⁾

	Si	SiC
禁制帯幅(eV)	1.12	3.26
熱伝導率(W/cmK)	1.5	4.9
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	2.8
移動度(cm ² /Vs)	1,350	1,000

(Insulated-Gate Bipolar Transistor)というバイポーラデバイス構造にする必要があったが、SiCではその高い絶縁破壊電界強度特性によって高電圧領域でもユニポーラデバイスであるMOSFETを使用でき、スイッチング時に発生する損失を大きく低減できる。このように、電力変換器であるインバータにSiCパワーデバイスを使用することによって、機器の小型化及び電力損失の低減を実現できる。

当社はSiCの開発初期からMOSFETの開発に取り組み、2006年1月にはSiC MOSFETを用いたフルSiCインバータを試作し、世界で初めて^(注1) 3.7kW定格の三相モータの駆動に成功した。2010年11月にはSi IGBTとSiC SBDを組み合わせた0.6kVのハイブリッドSiCパワーモジュールを世界で初めて^(注2) エアコンに搭載し、製品化した。さらにSiCパワーモジュールの高耐圧化を進め、鉄道車両用インバータ、主軸・サーボ多軸一体型ドライブユニットで実用化し、SiCの適用分野を着実に広げてきた。2013年12月には、SiC MOSFETとSiC SBDを組み合わせた3.3kVフルSiCパワーモジュールを鉄道車両用インバータに搭載し、製品化している⁽³⁾。

(注1) 2006年1月24日現在、当社調べ

(注2) 2010年8月24日現在、当社調べ

3. 6.5kVフルSiCパワーモジュールの開発

3.3kVの次のステップとして、NEDO助成事業によって6.5kVフルSiCパワーモジュールの開発に取り組んでいる。この助成事業には、三菱電機(株)、三菱マテリアル(株)、デンカ(株)、日本ファインセラミックス(株)、DOWAエレクトロニクス(株)が参画し、東京工業大学、芝浦工業大学、九州工業大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)と

共同研究を行っている。助成事業の期間は2014年8月～2018年2月である。

デバイスの出力密度が増加すると単位面積当たりの損失も大きくなるため、その結果発生する熱への対策が必要となる。図2にパワーモジュールの断面の模式図を示す。この開発では、熱への対策として次の3つの要素技術を開発し、Si IGBTに対して出力密度2倍を実現することを目標としている。

- (1) SiCを用いることでスイッチング損失を低減する。
- (2) 熱伝導率が高い絶縁基板を用いることでパワーモジュールの放熱性を高める。
- (3) Ag接合材を採用することで、高温動作で課題となる温度サイクル信頼性を確保する。

絶縁基板は三菱マテリアル(株)、デンカ(株)、日本ファインセラミックス(株)と連携し、Ag接合はDOWAエレクトロニクス(株)と連携し、開発を進めている。次に、これらの要素技術について述べる。

3.1 絶縁基板

パワーモジュールの放熱性を律速している絶縁基板に着目し、絶縁基板の高放熱化に取り組んでいる。この取り組みでは、絶縁基板の高放熱化に加えて、温度サイクルに対する信頼性を確保する必要がある。図3に示すように、絶縁材料としてAlN(アルミナイトライド)又はSiN(シリコンナイトライド)を用いるという2つのアプローチを行っている。

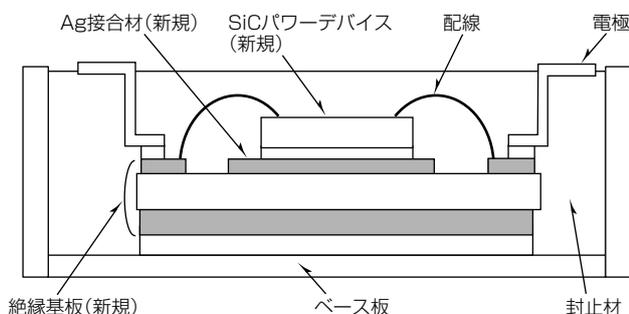


図2. パワーモジュールの断面模式図

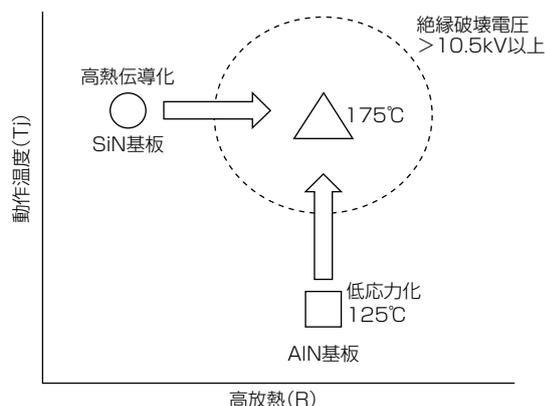


図3. 絶縁基板の開発の方向性

AlNは180W/(m・K)程度と高い熱伝導率を持っているが、機械強度が低いため、動作温度が高くなると熱応力によって破壊に至るという課題がある。Cu電極とAlNの間に応力緩和層としてAl電極を挿入し、CuとAlNの間に発生する熱応力を緩和することで、このような課題を克服できると期待される。

一方、SiNは高い機械強度を持つので高温化に適しているが、熱伝導率が70～90W/(m・K)と低いという課題がある。熱伝導を阻害する粒子内部の不純物や粒界相の量を低減することによって熱伝導率が大きく向上すると産総研から報告されており⁽⁴⁾、熱伝導率の改善が期待できる。

これらの観点で新たに改善したAlN、SiNの両基板に対して、単体又は評価用モジュールに組み込んで熱サイクル試験・熱伝導率評価を行った。その結果、-55～175°Cの温度サイクルに対して信頼性を確保できることを検証し、パワーモジュールの熱抵抗を15%程度低減できる見込みを得た。

3.2 Ag接合

チップの動作温度が従来の接合材料であるはんだの融点に近づいてくるため、チップ直下の接合部分の温度サイクル信頼性が課題となる。Ag接合は、有機保護膜で被覆されたAgナノ粒子を用いることで、はんだと同等のプロセス温度でチップと基板電極を高融点のAgで接合する技術である。Agの融点は962°Cと高く、高い温度サイクル信頼性を得ることができる。しかし、従来のAg接合材料では接合を形成する際に数10MPaという高い圧力で加圧する必要があった。接合プロセスを簡便にするために、低加圧化が望まれている。

新たに開発したAg接合材料を用いて、5MPaという低い加圧力でSiCパワーデバイスと絶縁基板上の銅電極の間にAg接合を形成できた。図4に低加圧Ag接合部の断面SEM(Scanning Electron Microscope)の観察像を示す。また、この接合部が-55～175°Cの温度サイクルに対して高い信頼性を持つことを確認した。

3.3 SiCパワーデバイス

パワーモジュールでは、一般にスイッチング素子と並列にフライホイールダイオードが接続されている。通常、フライホイールダイオードはスイッチング時に発生する逆方

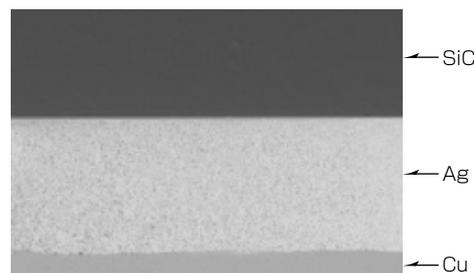


図4. 低加圧Ag接合部の断面SEM観察像

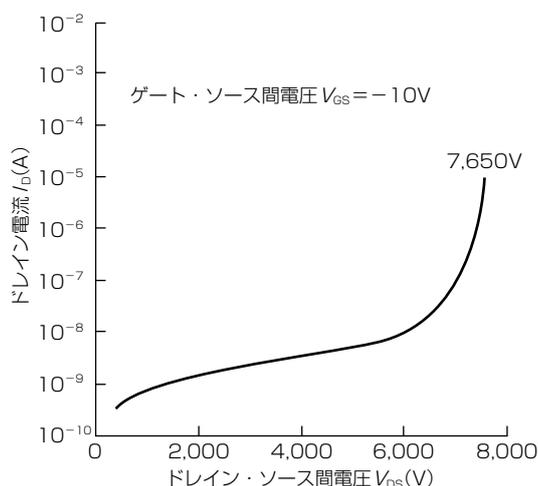


図5. SBD内蔵MOSFETの耐圧特性

向起電力からスイッチング素子を保護するために設置されるが、フルSiCパワーモジュールでは還流動作時にスイッチング素子であるMOSFETのボディダイオード劣化を防止するという観点でも必要となる。

SiCのpn接合部にバイポーラ電流が流れると、積層欠陥が拡張し、MOSFETの電気特性劣化を引き起こすことが知られている⁽⁵⁾。SiC MOSFETのボディダイオードにバイポーラ電流が流れるのを防止するには、非常に大きな容量のSBD(フライホイールダイオード)が必要となるため、設置面積が大きくなるという課題がある。SBDをMOSFETチップに内蔵させる構造とすることによって、SBDチップを設置する必要がなくなり、チップの設置面積を大幅に縮小することが可能となる。

そこで、SBDを内蔵した6.5kVのMOSFETを作製し、その特性を測定した⁽⁶⁾。図5に示すように、作製したSBD内蔵MOSFETは6.5kV以上の耐圧を持つことが確認できた。また、ダイオード特性を測定した結果、通常の動作範囲ではバイポーラ電流が流れないことを確認している。

3.4 6.5kVフルSiCパワーモジュールの設計

評価用の6.5kVフルSiCパワーモジュールを試作し、その損失を測定した。その損失は、従来のSiパワーモジュールに対して1/2以下であるという結果が得られた。この結果から、従来のSiパワーモジュールと同等の損失密度を許容できるモジュールでは、出力密度を2倍にしても熱的な問題は発生しないことが分かる。このことから、出力密度2倍を達成できる見通しを得た。

今後、新たに開発した要素技術を盛り込んだ高出力密度フルSiCパワーモジュールを試作し、Siパワーモジュールに対して出力密度2倍という目標を実証していく予定である。

4. むすび

SiCパワーモジュールの適用分野拡大に向け、NEDO助成事業によって6.5kVフルSiCパワーモジュールの開発を行っている。パワーモジュールの要素技術として、①高い熱伝導率と温度サイクル信頼性を両立させた絶縁基板、②高い温度サイクル信頼性を持ち、低加圧で接合可能なAg接合技術、③SBDを内蔵したデバイス構造を持つ6.5kVMOSFETを開発した。また、これらの要素技術の統合によって、Siパワーモジュールに対して出力密度2倍という目標を達成できる見通しを得た。今後、これらの要素技術を盛り込んだ6.5kV高出力密度フルSiCパワーモジュールを試作し、その性能を実証していく予定である。

なお、この研究はNEDO助成事業「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」から助成を受けて実施している。

参考文献

- (1) マジウムダール ゴーラフ, ほか: パワーモジュールの最新技術動向, 三菱電機技報, **86**, No.5, 262~266 (2012)
- (2) 松波弘之, ほか: 半導体SiC技術と応用(第2版), 日刊工業新聞社 (2011)
- (3) 菅原徹大, ほか: SiCパワーモジュールの主回路素子への適用技術, 三菱電機技報, **90**, No.9, 517~520 (2016)
- (4) Hirao, K., et al.: High Thermal Conductivity Silicon Nitride Ceramics, Journal of the Korean Ceramic Society, **49**, No.4, 380~384 (2012)
- (5) Galeckas, A., et al.: Recombination-enhanced extension of stacking faults in 4H-SiC p-i-n diodes under forward bias, APPLIED PHYSICS LETTERS, **81**, No.5, 883~885 (2002)
- (6) Kawahara, K., et al.: 6.5kV Schottky-Barrier-Diode-Embedded SiC-MOSFET for Compact Full-Unipolar Module, Proceedings of the 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, 41~44 (2017)