

# 特集 SiC半導体パワーデバイスの車載実用化の展望\*

## Prospects of the Practical Use of SiC Power Semiconductor Devices in Automotive applications

鶴田 和弘  
Kazuhiro TSURUTA

The superior properties of silicon carbide (SiC) power semiconductor devices compared with silicon (Si) devices are expected to have a significant impact on hybrid electric vehicles (HEV) and electric vehicles (EV). The use of SiC devices in HEVs and EVs enables reductions in size, weight, and the cost of power control units. The initial characteristics of the current SiC power devices have sufficiently satisfied the requirements of control units in HEVs and EVs, in which SiC devices have demonstrated superior properties. Breakthroughs for the practical use of SiC power devices in HEV/EV are the securement of reliability and the reduction of costs in large-size chips (100 Ampere class) and the development of packaging technologies for high temperature use.

### はじめに

近年、環境への意識の高まりとともに、ハイブリッド電気自動車 (HV)、電気自動車 (EV) など環境対応車の普及が進んでいる。自動車関連メーカ各社では次世代HV・EVの更なる普及のため、より小型・低コストで高効率な電動システムの開発が進められており、その中でインバータシステムの小型・低コスト・高効率化は重要な課題の一つとなっている。現在、このようなシステムにはパワー半導体デバイスとしてSi (シリコン)-IGBTが主に用いられているが、そのデバイスの性能は限界に近いところにあり、さらなる効率向上にはSiC (シリコンカーバイド) デバイスのような次世代パワー半導体デバイスの実用化が待たれている。SiCデバイスは現状のSiデバイスに比べ、2~3倍

の電流密度の動作、200℃以上の高温動作が可能であり、パワーエレクトロニクスシステムの更なる高出力密度化を可能とするものと期待されている。本稿では、将来、HV/EV分野において実用化が期待されるSiCパワーデバイスの現状と課題、実用化への展望について述べる。

### 1. HV・EVにおけるSiCパワーデバイス導入に対する期待

SiCはFig. 1に示すようにSiに比べて優れた物性を持っている。特に破壊電界強度、熱伝導度が高いという物性の優位性から、現状のSiデバイスに比べ、2~3倍の電流密度の動作、200℃以上の高温動作が可能であり、インバータなどパワーエレクトロニクスシステムの更なる高出力密度化を可能とするものと期待されて

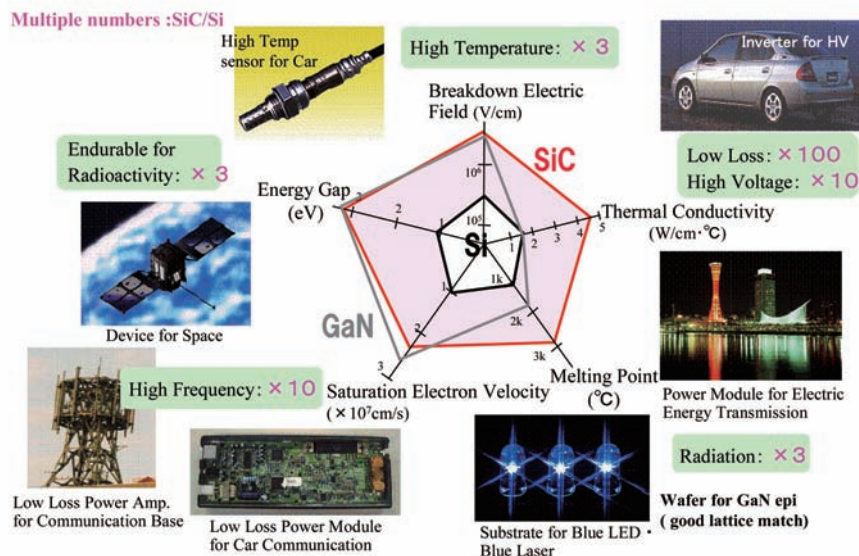


Fig. 1 Features and applications of SiC semiconductors

\*2011年8月3日 原稿受理

いる。例えば同じチップサイズなら、大容量化のため複数並列接続されているチップの数を減らすことができるし、同じ定格容量のチップならばチップサイズを1/2~1/3に小さくできるので、チップの実装スペースを小さくでき、システム全体も小型化が図れる。またSiCでは600V以上の高電圧であってもMOSFETのようなユニポーラデバイスでSi-IGBTのようなバイポーラデバイスよりも低抵抗が実現できるため、スイッチング損失はSi-IGBTの場合に比べて1/2~1/10程度に低減可能となる。したがって動作周波数の高周波化も容易となり、昇降圧コンバータなどに使われているような体格の大きな受動部品（リアクトルやコンデンサ）を1/2程度に小型化できる効果も期待できる。小型化したインバータをインホイールモーターなどアクチュエータと一体化すれば、車両レイアウトの自由度が高められることも期待されている。

また現在のシステムではSiパワーデバイスの動作温度の制限から、冷却系としてエンジン冷却系（110℃）を共用できず、別システムの専用水冷系（65℃）で冷却されているが、200℃を超える温度での動作も可能なSiCでは、エンジン冷却系（110℃）でも現状と同等以上の冷却能力を確保できるため、Fig. 2に示すように冷却系のエンジンとの共用化、さらには空冷化も可能になる。

上記効果は最大負荷時の発熱量と冷却能力を考慮してシステム設計に反映される効果であるが、実際の車の通常走行時（低負荷時）においても、SiC-MOSFETでは順方向電流がゼロ電圧から立ち上がるため、Si-IGBTによるインバータよりも低損失な動作が可能であるため、省エネルギー効果も期待できる。HV・EVではインバータの損失低減分の燃費改善効果は、システム構成や走行条件により大きく変わるため単純には

算出できないが、インバータシステムの小型、軽量化の効果も考慮すると、燃費が約5~10%改善可能という試算もなされている<sup>1)</sup>。

## 2. 現状の車載用SiCパワーデバイス開発の現状と課題

以上のようにHV・EV分野で期待されているSiCデバイスであるが、この用途では耐圧600~1200V、定格電流が100~400Aの大容量のMOSFET、SBD（ショットキーバリアダイオード）が要望される。

近年の開発事例を見てみると'07年にデンソーが100A級のSiC-MOSFET、SiC-SBDチップを用いたインバータモジュールによって車両用モータ駆動を発表した後、'08年に日産自動車はSiCダイオードを使用した車両用のインバータを開発し、燃料電池車での走行を発表した<sup>2)</sup>。ロームは、本田技術研究所と共同で、SiC-SBD、SiC-MOSFETを搭載した1200V・230A（280kVA相当）クラスの次世代電気動力車向けハイパワーインバータモジュールの開発を発表した。コンバータ回路（1相）とインバータ回路（3相）を1パッケージに搭載し、小型化を実現している。パワーモジュールの性能としてスイッチング損失が従来のSiデバイスと比較して約1/4以下に低減されており、駆動周波数を上げることができるため、例えば従来Si-IGBTを使用した場合のPWM周波数20kHzに対して、4倍の80kHzの高周波化も図れるとしている<sup>3)</sup>。'09年には三菱電機より、SiC-MOSFET（5.2mm×5.2mm）とSiC-SBD（5.2mm×5.2mm）を用いて11kW出力のSiCインバータの開発が発表され、従来のSiデバイスによるインバータに比べ、70%の損失低減と、体格を1/4に小型化を達成した<sup>4)</sup>。その後も各社で市販のHV・EVの出力に匹敵する大容量インバータの開発例が報告され、Siデバイスを用いた場合に比較して優れた性能が

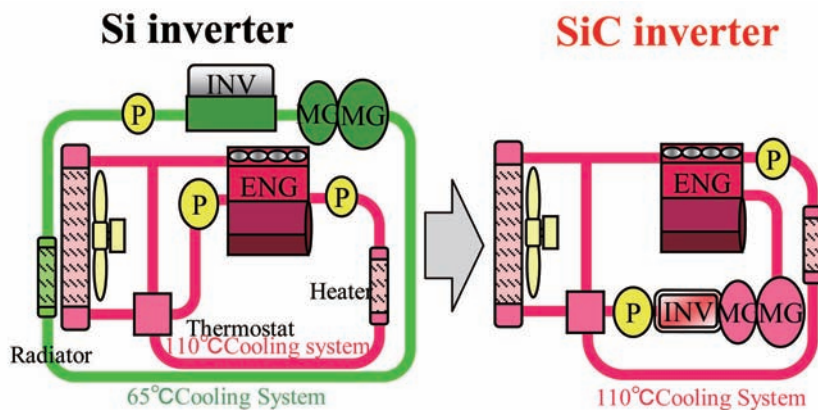


Fig. 2 Comparison between Si and SiC inverters in HV cooling systems

実証されてきている。Fig. 3, Fig. 4にデンソーにおけるSiC-MOSFET (7mm×7mm)とSiC-SBD (6mm×6mm)のデバイスの順方向電流・電圧特性を示す。これらを用いた1200V, 150AのSiCインバータモジュール (Fig. 5)では市販のHV用モータ駆動 (出力30kW)が可能であることが確認されている。また, Fig. 6は昇圧コンバータにおける損失の動作周波数依存性を示すものである。従来のSi-IGBTではスイッチング損失が大きく, 冷却能力の制約で動作周波数は50kHz程度までであるが, Si-MOSFETでは, スwitching損失が非常に少ないため, 100kHzの動作周波数でも動作が可能であることも確認されている。

以上のように, デバイスの初期特性としては十分な性能を達成できるレベルにある。今後の課題はシステムでの動作を想定した信頼性確保の段階にある。特に自動車では負荷変動が大きく, 過電流, 過電圧が発生する恐れがあるが, SiCデバイスでスイッチング損失低減するためスイッチング速度を上げると, より大きなサージ電圧や, リンギングが発生し, デバイスの誤

動作や破壊の危険性が増す。ユニポーラデバイスで耐熱性が高いSiCデバイスであっても十分なサージ耐量や, 短絡耐量が確保できることを, 使用される-40~150℃ (SiCの場合は200℃以上)の全温度領域で検証する必要がある。また信頼性において最も重要なMOSFETのゲート酸化膜の寿命においては30年以上確保できるとの報告例<sup>5), 6)</sup>があるが, 現状ではSiデバイスに比べて何桁も寿命は短く, 自動車のように過酷な環境で, 負荷変動を規定できない動作を要求されるものに対して長期間の寿命を保証できるか, 偶発故障を排除できるかは, 結晶欠陥の影響を含めて十分な評価解析が必要と考えられる。Fig. 7, Fig. 8はゲート酸化膜寿命と結晶欠陥との関係を調べた事例であるが, 従来のSiデバイスと同様にMOSキャパシタを試作し, TDDB (Time Depending Dielectric Breakdown)法により寿命を測定し, エミッション法によりその破壊箇所を同定し, 破壊箇所の断面TEMにより結晶欠陥を観察したものである<sup>7)</sup>。Fig. 7のTDDB測定結果ではφ50μmのサンプルは磨耗故障モードを示した

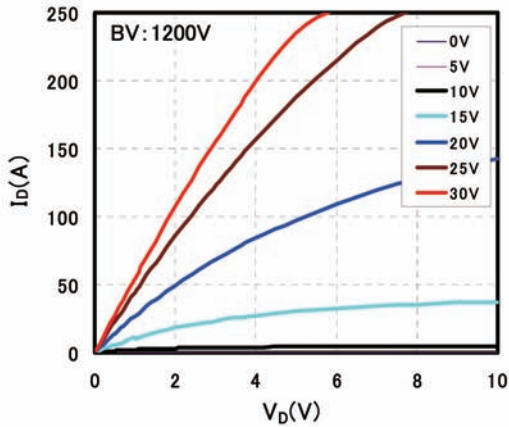


Fig. 3 Characteristics of SiC-MOSFET in ON-state

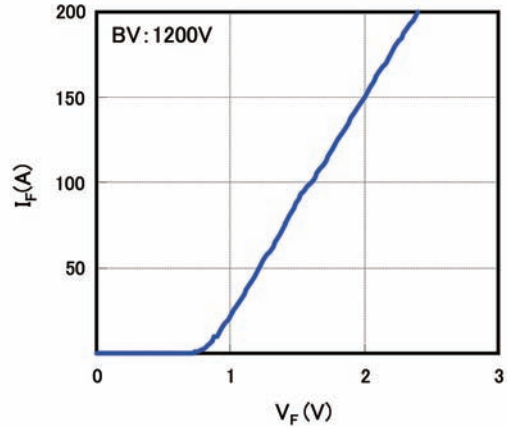


Fig. 4 Characteristics of SiC-SBD in ON-state

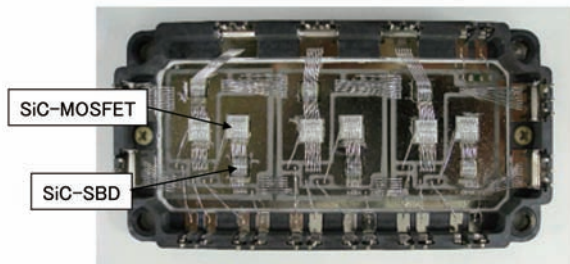


Fig. 5 Photo of an SiC inverter module (1200 V, 150 A)

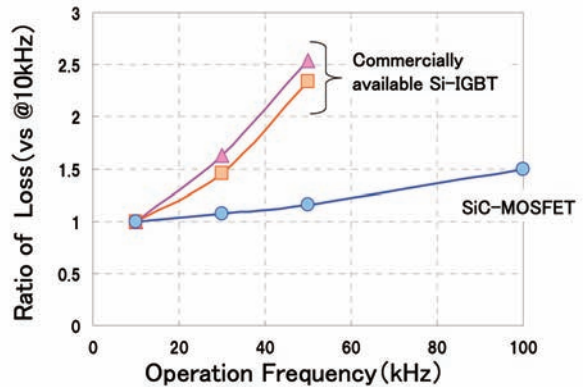


Fig. 6 Estimation of the power loss of a booster converter (250→500 V)



( $m=5.1$ )。径が大きくなるに従って寿命は短くなり、大きく3つのモード(A,B,C)に分かれた(Fig. 8)。Aは前述の磨耗故障モードである。モードAでは、破壊箇所の下に結晶欠陥は観察されなかった。このピットは、TDDDB測定にて破壊したときのサージ電流や電圧で結晶に生じたダメージに起因すると考えている。それに対して、モードBとCからは、破壊箇所下に貫通転位欠陥が観察された。転位欠陥をウィークビーム法によりさらに分類すると、モードBは主に刃状転位(TED)であった。モードCは主にらせん転位(TSD)であり、寿命はモードAと比較して約2桁短かった。その結果、らせん転位欠陥は寿命を大きく低下させ、低下量は磨耗故障時間と比較して約2桁であることがわかった。デンスーではウエハの高品質化の技術も開発しており、独自の結晶成長技術(RAF法)<sup>8)</sup>により、らせん

転位密度が市販のSiCウエハの10分の1以下(転位密度:  $300\text{個}/\text{cm}^2$ 以下)の $\phi 4$ ウエハを実現できている<sup>9)</sup>。HV・EV分野に求められる100A以上の電流容量のデバイスにはさらにもう1桁から2桁の転位密度低減が必要とされるが、今後確実に進歩すると予想している。

### 3. 実用化の展望

前述の信頼性の課題については、今後データが蓄積され、解析されてSiCデバイスとしての寿命設計の指針が近い将来、明らかになってくると考えている。そして実用化のために残る課題はコストである。最終的にはSiCパワーデバイスの適用によってインバータシステムの大幅な小型、低コスト化が期待されているため、少なくとも同じ定格容量のSiデバイスと同等以下のデバイスコストが実現できないとSiCのEV・HVへ

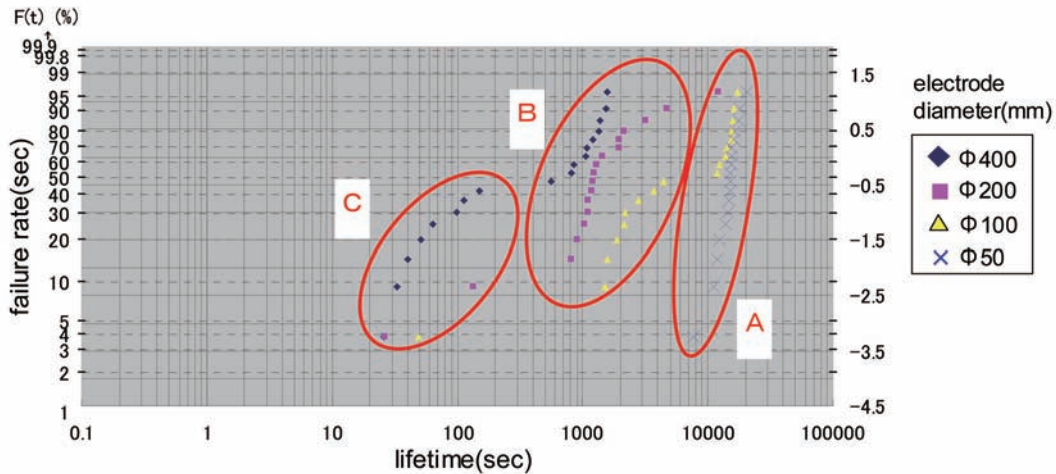


Fig. 7 Relationship between lifetime and failure rate in TDDDB measurement

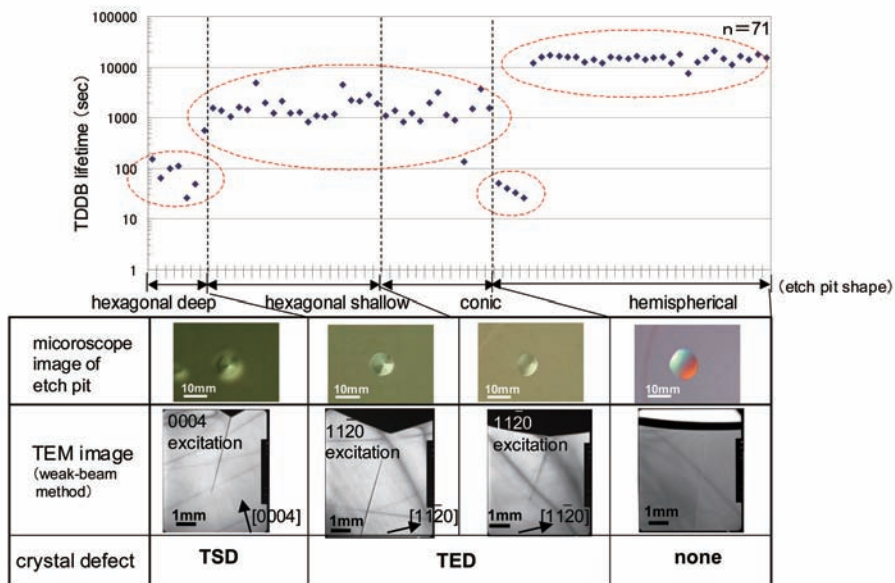


Fig. 8 Relationship between TDDDB lifetime and crystal defects

の採用は進まない。現状ではSiCウエハの口径はφ4インチまでしか市販されておらず、成長温度がSiに比べ高温が必要であり、スループットが低く、製造コストそのものが高価で価格がSiウエハの10倍以上高いため、同じ定格容量のデバイスのコストはSiの何倍も高いものになってしまう。HV・EV用Si-IGBTがφ8インチのウエハで製造されてきていることを考慮すると、たとえ同じ定格容量のチップ面積が1/3にできたとしても、SiCでもφ6インチ（150mm）以上の口径のウエハで製造しないと、Siデバイスと同等以下のコストは到底実現できない。既に米国CREE社からはφ150mmのSiCウエハが実現可能であることは実証されており<sup>10)</sup>、2013年くらいから実用レベルのものが供給される見込みである。ただし現状では、ウエハの結晶欠陥、エピタキシャル成長層のパーティクル等に起因する欠陥の影響で、100A以上の電流を流せる大面積チップになると歩留まりが非常に悪く、10A程度のチップが市販されているにすぎない。今後、SiCウエハの更なる大口徑化、高品質化、低コスト化を進めなければならない。

また、現状のインバータシステム等で一般的に用いられているパワーデバイスの実装形態では、アルミボンディングワイヤの電流密度限界、はんだの温度限界、封止材の温度限界等のため、200℃以上の動作が可能なSiCデバイスよりも実装面での制約で出力密度限界が決まってしまう恐れがある。また、デバイスの熱設計においても、IGBT、PNダイオードといったバイポーラ動作が主流のSiデバイスではほぼ許容動作温度の上昇分に比例して電流密度を上げられると考えられるが、MOSFET、SBDといったユニポーラ動作が主体のSiCデバイスでは導通抵抗の温度係数が大きいため、許容動作温度の上昇分に比例して電流密度が上げられるわけではない。さらに単位面積あたりの発熱密度が大きくなるため、その分放熱能力を高くしないとSiデバイス同じ電流容量でかえって電力損失が大きくなってしまうこともあり得る。したがって、SiCデバイスの特長を活かすためには、従来のSiデバイスとは異なる実装技術、放熱技術、高耐熱材料の開発も必要と考えられる。

## おわりに

SiCパワーデバイスの実用化は既に、10A程度の小電流容量ダイオードから電源分野中心に進んでいる。またMOSFETについてもサンプル出荷が開始された。今後、ウエハの低コスト化、大口徑化、高品質化が進み、50A程度の電流容量のダイオード、MOSFETが実用化に目処が立てば、太陽光発電用パワーコンディショナ等エネルギー分野への適用が始まり、SiCパワー半導体デバイスの市場が拡大するものと予想される。その後100A以上の電流容量のSiCデバイスの信頼性、歩留りが実用レベルになりHV・EVへの適用も開始されることだろう。

## <参考文献>

- 1) 財団法人 新機能素子研究開発協会 平成15年度 NEDO調査研究報告書「SiC半導体／デバイス事業化・普及戦略に係わる調査研究」平成16年3月
- 2) 日産自動車 2008.9.5 プレスリリース資料
- 3) ローム 2008.9.11 プレスリリース資料
- 4) 三菱電機 2009.2.18 プレスリリース資料
- 5) S. Ryu et al, "Performance, Reliability, and Robustness of 4H-SiC Power DMOSFETs", Proceedings of ICSCRM 2009, 15 October 2009, Nurnberg, Germany
- 6) K. Fukuda et al, "Influence of processing and material defects on electrical characteristics of SiC-SBDs and SiC-MOSFETs", Proceedings of ICSCRM 2009, 12 October 2009, Nurnberg, Germany
- 7) 山本 他：SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第19回講演会 予稿集, p.11, 2010.10.21-22
- 8) 奥野 他：デンソーテクニカルレビュー Vol.10, No.2, 2005
- 9) 山内 他：SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第19回講演会 予稿集, p.36, 2010.10.21-22
- 10) CREE 2010.8.30 プレスリリース資料

---

<著 者>



鶴田 和弘  
(つるた かずひろ)  
基礎研究所 機能材料研究部  
SiCパワーデバイスとモジュール  
実装技術の研究開発に従事