

# 鉄道車両用フルSiC適用インバータを実現する 3.3kV耐圧SiC-MOSFETの低抵抗化技術

濱田憲治\* 梅畚 勲†  
日野史郎\*\*  
末川英介\*\*\*

Low On-resistance SiC-MOSFET with Blocking Voltage of 3.3kV Realizing All-SiC Traction Inverter  
Kenji Hamada, Shiro Hino, Eisuke Suekawa, Isao Umezaki

## 要旨

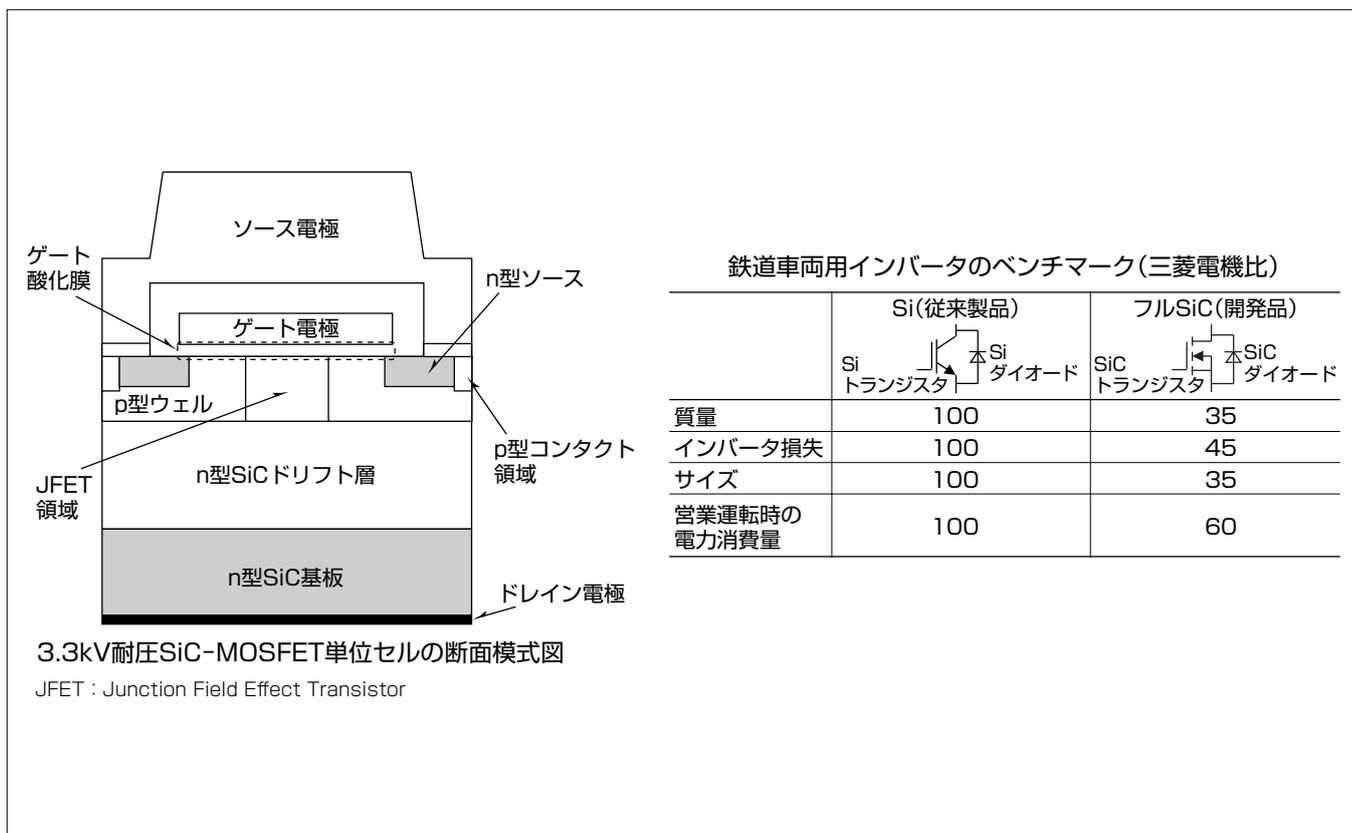
パワーエレクトロニクス機器の高効率化、小型化に貢献してきたSi(シリコン)パワーデバイスの性能改善が限界に達しつつある昨今、次世代パワー半導体材料としてSiC(シリコンカーバイド)を用いるSiCパワーデバイスが注目されている。

三菱電機はSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)及びSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)等のSiCパワーデバイスの低電力損失化や高機能・大電流化の開発とともに、これらの応用技術開発を並行して進めている。鉄道用途では、1.7kV耐圧のSiC-SBD及びSi-IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistor)で構成するハイブリッドSiCを適用した鉄道車両インバータを製品化し、電力損失低減や機器の小型化を実証している。

Si-IGBTの代わりにSiC-MOSFETを適用したフルSiCは電力損失低減効果が更に大きく、省エネルギーと小型軽量化に対する要求が強い鉄道用途で、3.3kV定格のフルSiCを適用した鉄道車両インバータの実現が切望されていた。

そこで、高温動作時でも高い電子移動度を維持しMOSFETの低抵抗化を実現する独自の技術と、信頼性確保のための低電界設計技術を用いて3.3kV耐圧SiC-MOSFETを開発した。また、MOSFETに内在するボディダイオードの信頼性を検証した。さらに、開発したMOSFETを搭載した鉄道車両用フルSiC適用インバータによって、高耐圧域におけるSiCの優位性を世界で初めて(注1)実証した。

(注1) 2015年6月22日現在、三菱電機調べ



## 3.3kV耐圧SiC-MOSFETのデバイス構造及びこれを搭載した鉄道車両用インバータの性能比較

p型ウェル同士に挟まれたJFET領域の高濃度化によって、高温動作時でも高い電子移動度を維持して低抵抗化を実現する独自の技術を用いて、3.3kV耐圧SiC-MOSFETを開発した。これを搭載した鉄道車両用フルSiC適用インバータは、従来製品に比べて55%減のインバータ損失、65%減のサイズ・質量、40%減の電力消費量を達成し、装置の大幅な低損失化、小型・軽量化、省エネルギーを実現した。

## 1. ま え が き

パワーエレクトロニクス機器の高効率化、小型化に貢献してきたSiパワーデバイスの性能改善が限界に達しつつある昨今、次世代パワー半導体材料としてシリコンと炭素の化合物であるSiCを用いるSiCパワーデバイスが注目されている。Siに比べて絶縁破壊電界強度や熱伝導度が高いといった特長を持つSiCをパワーデバイスに用いることで、Siパワーデバイスを凌駕(りょうが)する低抵抗・高電圧化が可能になる。

SiCパワーデバイスは、20kVを超える電圧領域でも単独素子で使用することができる。このような高電圧領域では、デバイスを低抵抗化するために電子と正孔による伝導度変調効果を利用したSiCバイポーラデバイスが用いられる。一方で、3.3kV以下の電圧領域では、SiCユニポーラデバイスが用いられるのが一般的である。これは、既存のSiバイポーラデバイスに比べて低抵抗かつ高速スイッチング動作が可能になるためである。中でも600Vから2kV耐圧のSiC-MOSFETに関しては数多くの報告例があり、これらを電力変換用モジュールに適用することで、効率改善や機器の小型化が実証されている。3.3kV耐圧が要求される産業用や鉄道車両用としても、SiCユニポーラデバイス技術を享受することができる。特に、高速鉄道のような高電圧・高周波数を扱う分野で、SiC-MOSFETはSi-IGBTに比べてスイッチング損失を大幅に低減できるというメリットがある。構成部品であるスイッチング素子及び整流素子の両方にSiCパワーデバイスを用いたフルSiCは電力損失低減効果が大きく、省エネルギーと小型・軽量化に対する要望が強い鉄道分野で、3.3kV定格のフルSiCを適用した鉄道車両用インバータの実現が切望されていた。

本稿では、独自に開発した低抵抗化技術を含め、三菱電機での3.3kV耐圧のSiC-MOSFETの開発内容について述べる。また、これらのパワーエレクトロニクス機器への応用例として、3.3kV/1,500A定格の大容量フルSiCモジュール及び世界初の鉄道車両用フルSiC適用インバータの実証結果を述べる。

## 2. 3.3kV耐圧SiC-MOSFETの開発

### 2.1 MOSFETの低抵抗化技術(JFETドーピング)

三菱電機の3.3kV耐圧SiC-MOSFETの基本構造は、Si-MOSFETに広く採用されているDMOSFET(Double-diffused MOSFET)構造である<sup>(1)</sup>。ここでは、当デバイスの低抵抗化を実現するための独自開発技術について述べる。

MOSFET単位セルの断面模式図を図1に示す。ゲート電極とチャネル領域を半導体の表面に沿って形成するプレーナゲート型のMOSFETでは、原理上、p型ウェル同士に挟まれた比較的幅の狭いJFET領域が形成される。3.3kV耐圧SiC-MOSFETでは、高電圧を保持するために

ドリフト層の不純物濃度を比較的強く設計しているため、JFET領域の抵抗成分、すなわちJFET抵抗が高くなりやすい。また、SiC中の電子移動度は負の温度依存性を持ち、不純物濃度が低いほど依存性が大きい。これは、室温時だけでなくデバイスの実使用環境である高温時の抵抗増大(通電損失の増大)につながり望ましくない。

n型不純物である窒素の多段イオン注入によってJFET領域を高濃度化してJFET抵抗を低減する、JFETドーピング技術を開発した。JFET領域を単純に高濃度化するとその直上にあるゲート酸化膜への電界が増大し、MOSFETの耐圧や長期的な信頼性に悪影響を及ぼすため、電界シミュレーションによる低電界設計を行った。これによって、ゲート酸化膜電界の増大を抑制しつつJFET抵抗を低減する最適なイオン注入プロファイルを決めた。

チャネル長0.7μm、JFET長3.0μm、有効面積4.8×10<sup>-5</sup>cm<sup>2</sup>のMOSFETに対する実効オン抵抗の温度依存性を図2に示す。JFETドーピングを実施したMOSFETの実効オン抵抗は、実施しないMOSFETに比べて室温で12mΩcm<sup>2</sup>、150℃で23mΩcm<sup>2</sup>低減した。これは、JFETドーピングによってイオン化不純物散乱の影響が大きくなり、JFET領域での電子移動度の温度係数が小さくなった結果、高温動作時でも高い電子移動度を維持することを裏付けている。JFETドーピングは、室温だけでなく高温でもMOSFETの低抵抗化を実現できる、極めて有効な手法であるといえる。

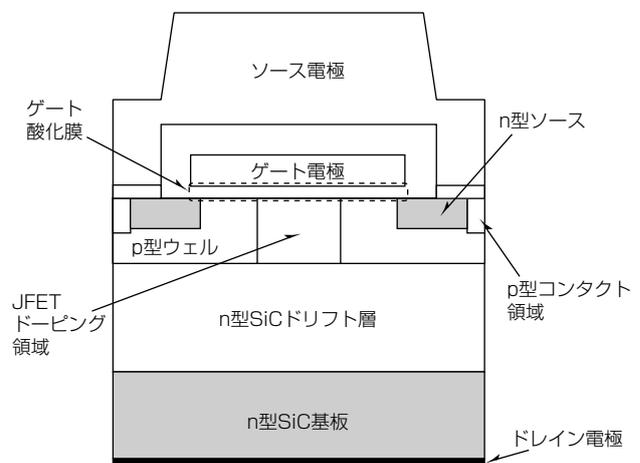


図1. 3.3kV耐圧SiC-MOSFET単位セルの断面模式図

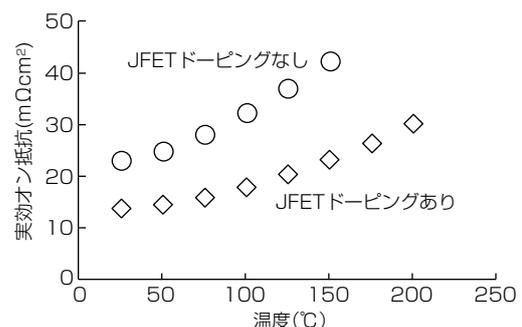


図2. 実効オン抵抗の温度依存性

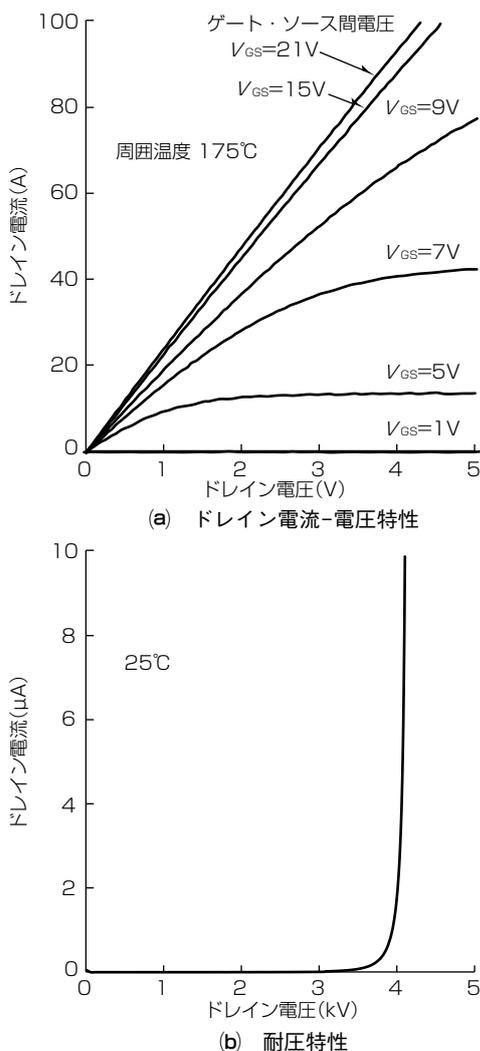


図3. 大容量MOSFETの特性

## 2.2 MOSFETの大容量化

既存のSiパワーデバイスを用いた電力変換用モジュールでは、1素子あたり数十A以上の大電流を出力可能な大面積チップを並列接続して必要な電流容量を確保している。中でも、鉄道車両用パワーモジュールでは大容量の電力変換を行うため、これをSiCパワーデバイスで置き換えるためには、Siパワーデバイスと同等の電流容量まで近づける、すなわちMOSFETの大容量化が必要である。

三菱電機はこれまで蓄積した技術的知見を活用し、1素子あたり100A級の電流容量を持つ大容量MOSFETを実現した。3.3kV耐圧の大容量SiC-MOSFETのドレイン電流-電圧特性及び耐圧特性を図3に示す。アバランシェ降伏電圧は約3.9kV、周囲温度175°Cでの実効オン抵抗は33mΩ/cm<sup>2</sup>であり、3.3kV耐圧を十分に確保しつつ低抵抗なMOSFETを実現した。

大容量MOSFETの動特性試験の一環として実施したRBSOA(Reverse Bias Safe Operating Area)試験結果を図4に示す。電源電圧及び遮断電流はそれぞれ2.5kV/540Aである。MOSFETの性能実力として定格電流の5倍を超える電流を遮断可能であり、その堅固性を実証した。

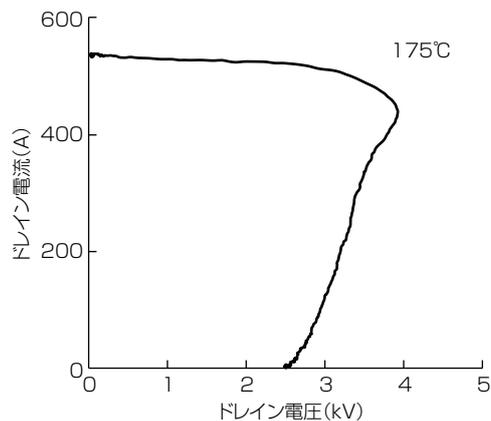


図4. 大容量MOSFETのRBSOA試験結果

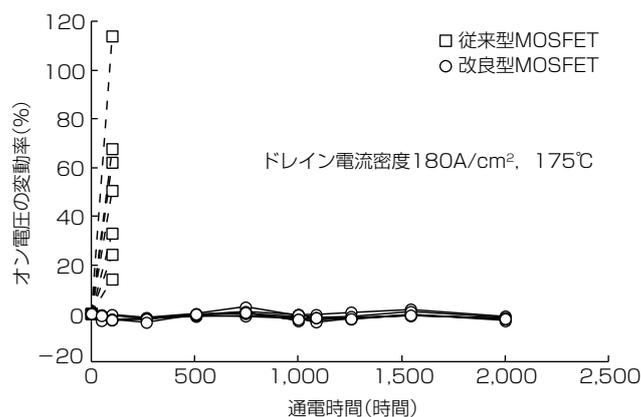


図5. ボディダイオードへの順方向通電試験結果

## 2.3 MOSFETボディダイオードの長期信頼性

MOSFETには構造上、ドレイン-ソース間に寄生のpn構造(ボディダイオード)が内在する。これを活用することで、パワーモジュールの構成要素の1つである整流素子を削減し、スイッチング素子の搭載面積を増加できるため、モジュールサイズを維持しつつ大容量化が可能になる。しかし一方で、ボディダイオードへの順方向通電(バイポーラ動作)によってSiCの結晶劣化が進行し、ボディダイオードのオン電圧が上昇する問題が明らかになっている。

三菱電機は従来型と改良型の2種類のMOSFETを作製し、これらに内在するボディダイオードの長期信頼性を検証した。改良型MOSFETでは、n型SiCドリフト層の成長条件を最適化した。ボディダイオードへの順方向通電時間に対するオン電圧の変動率を図5に示す。従来型MOSFETでは100時間の順方向通電後に著しい劣化(オン電圧の増加)が見られる一方で、改良型MOSFETでは2,000時間の順方向通電後もなお、オン電圧の変動が抑制された。

## 3. 大容量フルSiCパワーモジュールの実現

構成部品であるスイッチング素子及び整流素子の両方にSiCパワーデバイスを用いた3.3kV/1,500A大容量フルSiCパワーモジュールを開発した。このモジュールでは、2章で述べたJFETドーピングを適用して低抵抗化し

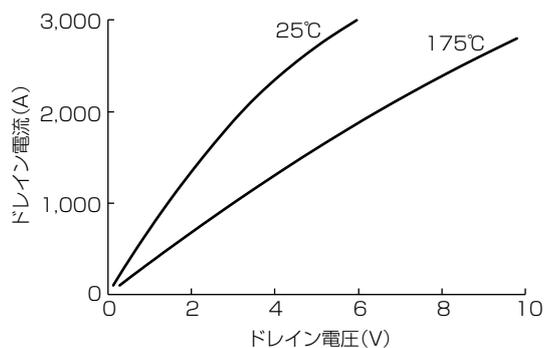


図6. フルSiCモジュールのドレイン電流-電圧特性

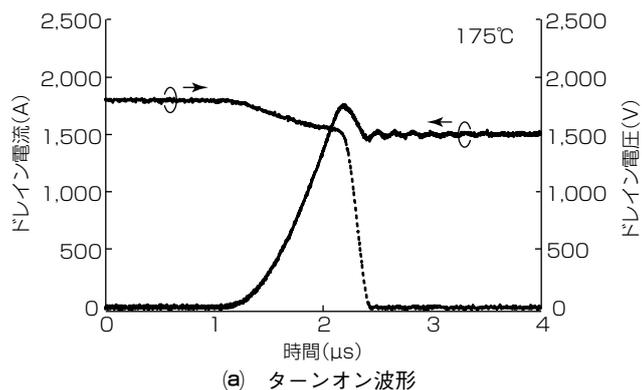


図8. 直流1,500V架線対応の鉄道車両用インバータ装置

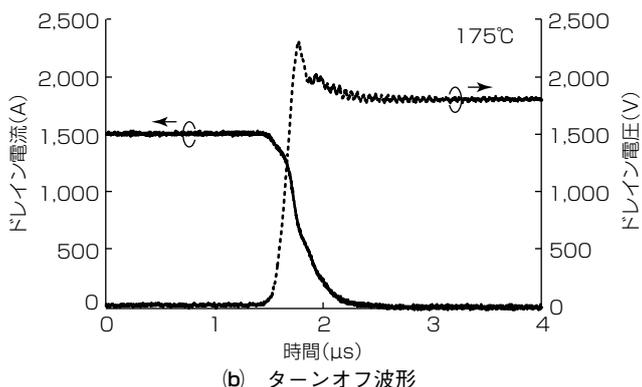
架線対応の鉄道車両用インバータ装置を世界で初めて<sup>(注2)</sup>製品化した。装置の外観を図8に示す。従来のSi製品と比較して、55%減のインバータ損失、65%減のサイズ・質量を達成し、装置の大幅な低損失化と小型・軽量化を実現した。スイッチング素子にSiCを用いた電鉄駆動用のパワーモジュールは三菱電機以外に事業化の報告がない<sup>(注3)</sup>。現在、このモジュールは各社の鉄道車両のインバータ装置に組み込まれて営業運転中であり、40%近い省エネルギー効果が実証されている。また、交流架線からの電力を主電動機に供給する主変換装置にこのモジュールを適用し、東海道新幹線N700系車両に搭載されて走行試験が実施された。

(注2) 2013年12月25日現在、三菱電機調べ

(注3) 2017年3月現在、三菱電機調べ



(a) ターンオン波形



(b) ターンオフ波形

図7. フルSiCモジュールのスイッチング波形

た3.3kV耐圧の大容量MOSFET及びSBD<sup>(2)</sup>を並列接続して大容量化を実現している。このモジュールのドレイン電流-電圧特性を図6に示す。SiC中の電子移動度が負の温度依存性を持つためドレイン電流は高温ほど低下する。したがって、電流集中による熱暴走を避けることができ、並列動作に見合った特性が得られている。

このモジュールのスイッチング波形を図7に示す。多並列化しても波形のリングング(減衰振動)が小さいことが分かる。フルSiCを適用することで、ターンオン時のピーク電流やターンオフ時のテール電流の低減が可能となり、従来のSiモジュールと比較してターンオン損失、ターンオフ損失を大幅に低減した<sup>(2)</sup>。

#### 4. 鉄道システムでの省エネルギー効果の実証

大容量フルSiCパワーモジュールを適用した直流1,500V

#### 5. む す び

省エネルギーと小型・軽量化に対する要望が強い鉄道分野への応用を狙い、3.3kV耐圧のSiC-MOSFETを開発した。高温動作時でも高い電子移動度を維持しMOSFETの低抵抗化を実現するJFETドーピングを独自に開発するとともに、n型SiCドリフト層の成長条件を改良したMOSFETのボディダイオードの信頼性を検証した結果、低抵抗かつ高信頼なMOSFETを実現した。これを搭載した3.3kV/1,500A大容量フルSiCパワーモジュールによって、インバータ損失で従来比55%低減を達成する等、高耐圧域におけるSiCの優位性を世界で初めて実証した。今後は他耐圧クラスのSiCパワーモジュールへの展開を進めるとともに、ほかの応用機器分野に向けた開発を継続する。

この研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構(NEDO)の委託研究として実施したものである。

#### 参 考 文 献

- (1) 濱田憲治, ほか: 3.3kV耐圧SiC-MOSFETの低抵抗化技術, 三菱電機技報, **88**, No.5, 309~312 (2014)
- (2) Hamada, K., et al.: 3.3kV/1500A power modules for the world's first all-SiC traction inverter, Japanese Journal of Applied Physics, **54**, No.4S, 04DP07 (2015)