特集論文

SiCパワーデバイスの現状

油谷直毅*
渡邊　寛**
古川彰彦***

Present State of SiC Power Devices

Naoki Yutani, Hiroshi Watanabe, Akihiko Furukawa

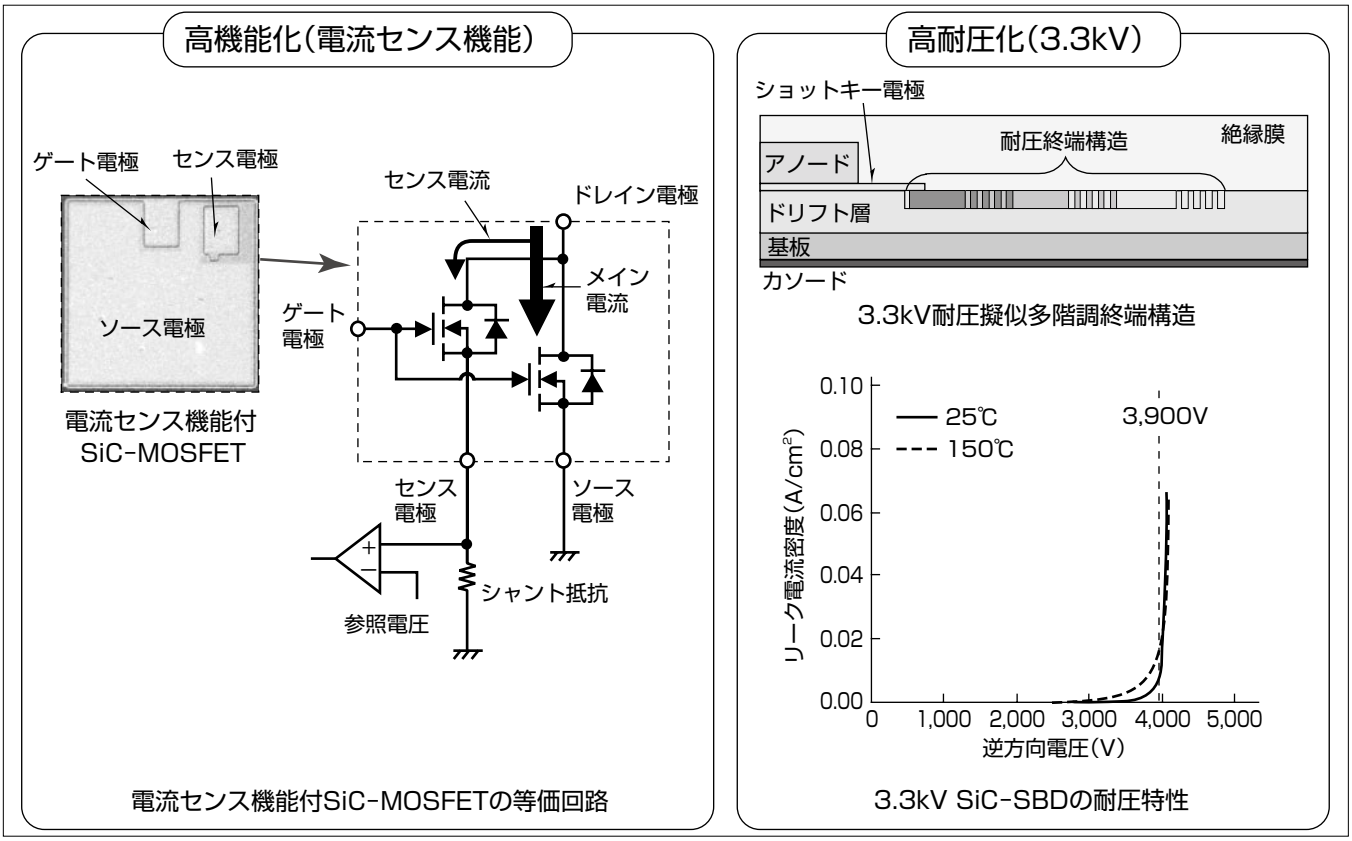
要　旨

新しい半導体材料のSiC(Silicon Carbide)を用いたパワーデバイスは，パワーエレクトロニクス機器の低損失化，小型化等を実現する次世代のキーデバイスとして注目を集めている。

三菱電機はSiCのメリットを活用するユニポーラデバイスのSiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)とSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)の開発を継続している。これまでに，開発した耐圧1,200VのSiC-MOSFETとSiC-SBDを用いて11kW出力のSiCインバータの試作に成功し，従来のインバータに対して体積を1/4とし，かつ，パワーモジュールにおける損失を70%低減できることを実証した。また，耐圧1.7kVのSiC-SBDを開発し，Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)と組み合わせた1.7kV／1,200Aの高耐圧大容量インバータモジュールを実現した。当社はSiCパワーデバイスの低電力損失化や高機能化や高耐圧・大電流化の開発と並行してインバータへの適用などの応用技術の開発を積極的に進めており，製品化に向けた開発を加速している。

産業用や鉄道車両用にSiCパワーデバイスの適用範囲を拡(ひろ)げるためには，IPM(Intelligent Power Module)化を実現するためトランジスタへのセンス内蔵による高機能化や，耐圧領域の拡大が必要である。

本稿では，高機能化として，電流センス機能を内蔵して過電流に対する保護動作を可能にした1,200V耐圧のSiC-MOSFETの開発内容，及び高耐圧化として，3.3kV級のSiC-SBDの開発内容について述べる。



SiCパワーデバイスの高機能化と高耐圧化

高機能化として，電流センス機能を備えたSiC-MOSFETを開発した。電流センスはMOSFETに流れる電流の一部を分流するもので，IPMの保護回路がこの分流した電流を監視し，過電流を検知すると駆動回路を遮断して素子の破壊を防ぐ。また，高耐圧化として，3.3kV級のSiC-SBDを開発した。擬似多階調終端構造を採用することによって3.3kV耐圧に対して十分高い3.9kVの耐圧を持つSiC-SBDが得られた。

*パワーデバイス製作所　**先端技術総合研究所(工博)　***同研究所

1. まえがき

低炭素社会を実現す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。半導体パワーデバイスは電力を効率よく制御するために家電製品から産業・宇宙製品にいたる広い分野で使用されており，パワーデバイスを用いた電力変換器の低損失化や小型・軽量化による省資源化は低炭素社会の構築に向けて大きな効果が期待される。

新しい半導体材料のSiCを用いたパワーデバイスは，パワーエレクトロニクス機器の低損失化，小型化等を実現する次世代のキーデバイスとして注目を集めている。SiCはSiよりも高い絶縁破壊電界強度特性を持つので，SiCを使うことによって低抵抗で高電圧のデバイスが実現できる。また，ユニポーラデバイスのMOSFETとSBDが使用できるので，Siのバイポーラデバイスに比べてスイッチング損失を小さくすることができる。

現在，SiCを用いたパワーデバイスとしてはSBDが耐圧600V～1,200Vクラスで市販されており，MOSFETなどのトランジスタについても複数のメーカーから入手可能になってきている。当社はこれまでに，耐圧1,200VのMOSFET，SBDを開発して11kW出力のSiCインバータを試作し，従来のインバータに対して70%の損失低減を実証している[(1)]。また，耐圧1.7kVのSiC-SBDを開発して，Si-IGBTと組み合わせた1.7kV／1,200Aの高耐圧大容量インバータモジュールを開発している[(2)]。

産業用や鉄道車両用のSiCパワーデバイスでは，低電力損失の実現のみならず，高機能化や高耐圧，大電流化への対応が必要である。過電流に対する保護回路を内蔵したIPMの実用化にはSiCパワーデバイスに電流センス機能を付加する高機能化が必要である。また，3.3kV級に高耐圧化したSiCパワーデバイスが切望されている。

本稿では，高機能化対応としての電流センス機能を搭載した1,200V耐圧のSiC-MOSFETの開発内容について述べ，高耐圧化の対応として，3.3kV級の耐圧終端構造の設計と，この耐圧終端構造を適用したSiC-SBDの開発内容について述べる。

2. 電流センス機能搭載のSiC-MOSFET

2.1 デバイス構造

当社は世界で初めて[(注1)]電流センス機能を搭載したSiC-MOSFETを開発した。電流センスはMOSFETに流れる電流の一部を分流するもので，IPMの制御基板内の保護回路がこの分流した電流を監視し，短絡時の過電流を検知すると，駆動回路を遮断し，素子の破壊を防ぐとともに，IPM搭載機器を保護する。特に低抵抗化したSiCパワーデバイスでは高速な遮断保護が必要になる。**図1**に電流センス機能搭載MOSFETのチップ写真と等価回路図，及びシャント抵抗による過電流検出手法を示す。ソース電極領域には10μmサイズのMOSFETのユニットセルを複数個並列接続したメインセルが配置されている。センス電極にはメインセルと同等の構造で並列接続数が少ないセンスセルが接続されている。メインセルとセンスセルはドレイン電極とゲート電極を共通として，それぞれソース電極とセンス電極に接続されている。ドレイン電極からの電流の一部が分流されてセンスセルに流れる。分流されたセンス電流はセンス電極に接続されたシャント抵抗に流れる。センス電流が増加するとシャント抵抗端の電圧が上昇する。メイン電流に過電流が流れた時に遮断信号を発生できるようにシャント抵抗と参照電圧を調整する。

（注1） 2011年2月16日現在，当社調べ

2.2 電気特性

図2に電流センス機能搭載MOSFETの室温でのメイン電流，センス電流-ドレイン電圧特性を示す。15Vのゲート電圧で3.7mΩcm^{2}のオン抵抗が得られている。**図2**の電流の絶対値の違いはユニットセル数の相違によるものであるが，両者の出力特性で類似の波形であることが分かる。また，図示はしていないが，ゲートのオフ時に1,400V以上のアバランシェ耐圧を実現している。

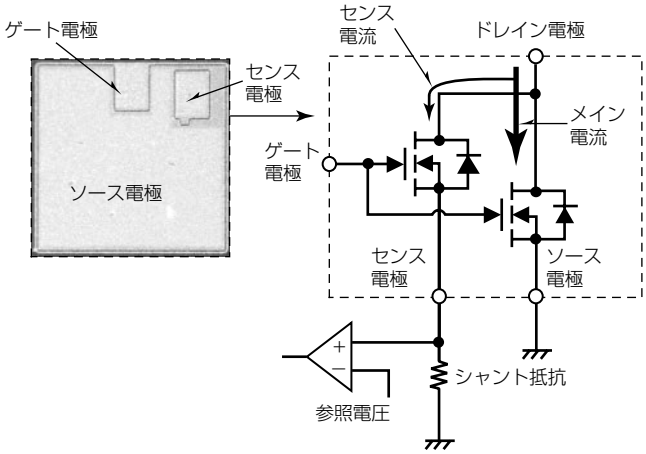


図1．電流センス機能搭載のSiC-MOSFETの光学顕微鏡像と等価回路

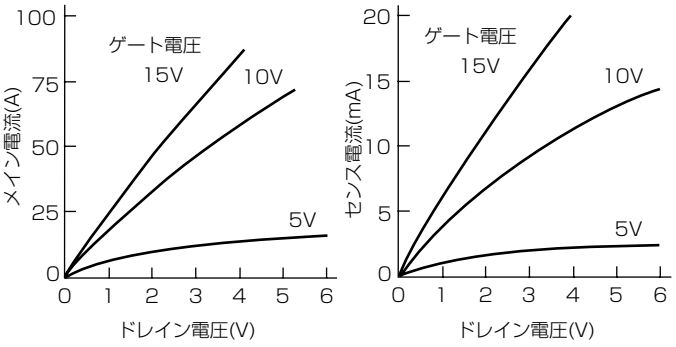


図2．メイン電流，センス電流-ドレイン電圧特性

図 3 に電流センス比率のメイン電流依存性，及び温度依存性を示す。電流センス比率はメイン電流に対するセンス電流の比率である。25℃の場合，電流センス比率は4,400の値でほぼ一定である。この値は，メインセル数と電流センスセル数の比率より小さい値である。さらに，温度上昇とともに，電流センス比率は小さくなるが，175℃までの温度範囲内では10%以内で温度依存性は小さい。

次に，電流センス機能搭載MOSFETの動特性評価結果について示す。**図 4** は過電流の検出，ターンオフ特性を示したものである。評価条件としては，オン時のゲート電圧を15V，オフ時を－10Vに設定し，電源電圧を600Vとしている。過電流レベルを600A/cm^2（56A）として遮断動作を評価した。図に示すようにメイン電流が増加するに従ってセンス電圧が上昇する。過電流のレベルまでセンス電圧が達したところで保護回路によってゲート電圧がオフになり正常に電流が遮断できることが分かる。

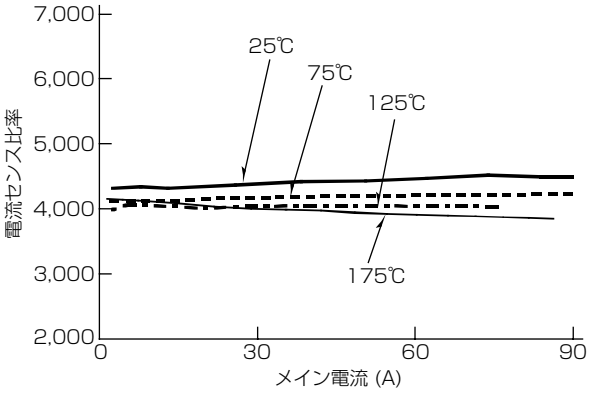


図 3．電流センス比率のメイン電流依存性

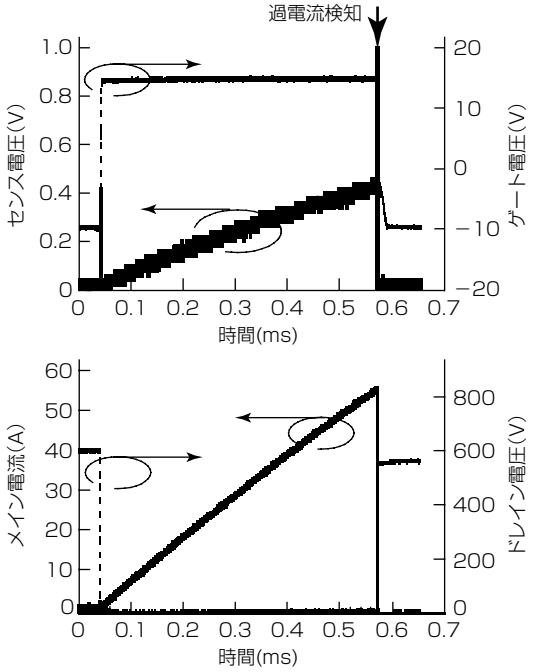


図 4．過電流検知遮断特性

3．3.3kV SiC-SBD

3.1　耐圧終端構造の設計

SiCではSiと比較して絶縁破壊電界強度が約10倍高いことから耐圧を決めているドリフト層のドーピング濃度の高濃度化や膜厚の薄膜化が可能で，Siよりも低抵抗のデバイスが実現できる。しかしながら，素子周辺部の耐圧終端構造の電界強度もSiに比べ高くなるので，電界強度を低減して耐圧を確保する終端構造の設計が非常に重要となる。そこで，デバイスシミュレーターを用いて3.3kV対応のSiC-SBDの終端耐圧構造の検討をおこない，**図 5** に示す擬似多階調終端構造を選定した。SiC-SBDのショットキー電極端の周囲はリング状にp型不純物（Al）をイオン注入したガードリングを形成するが，単純なリング状のガードリングではリングの外側の電界強度が局所的に高くなり3.3kV級の高電圧では耐圧が確保できなくなる。したがって，3.3kV対応の終端構造としては終端の外側方向に電圧を緩やかに下げて局所的に電界強度が高い部分ができないようにする工夫が必要になる。図に示した擬似多階調終端構造では，２枚の注入マスクで高濃度と低濃度のAl注入を行う。図の①は高濃度注入と低濃度注入を重ねた領域で，③は高濃度注入だけの領域で，⑤は低濃度注入だけの領域である。②，④，⑥は複数の間隙がある注入領域の高濃度と低濃度の組合せで実効的に濃度を調整した領域である。①～⑥で実効的に６種類の濃度領域を形成できる。このようにすることで，耐圧終端領域に注入された不純物濃度の分布を６段階で制御して電界緩和効果を高めることが可能となる。

図 6 に擬似多階調終端構造の耐圧シミュレーション結果

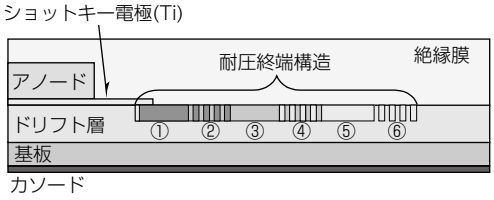
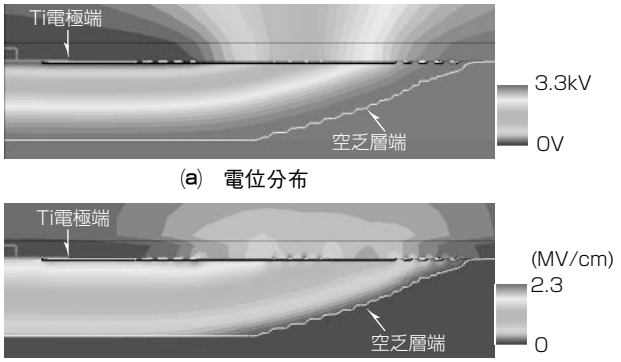


図 5．擬似多階調終端構造



(a)　電位分布

(b)　電界強度分布

図 6．擬似多階調終端構造の耐圧シミュレーション(3.3kV印加時)

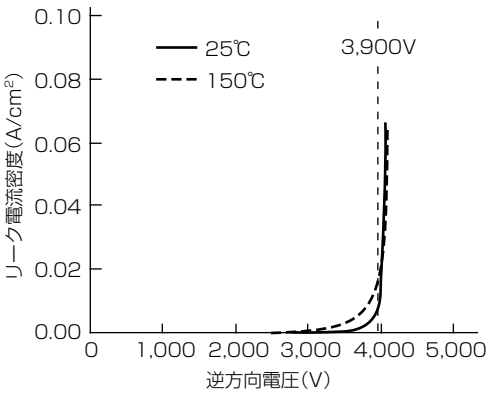


図7．試作SiC−SBDの逆方向電流−電圧特性

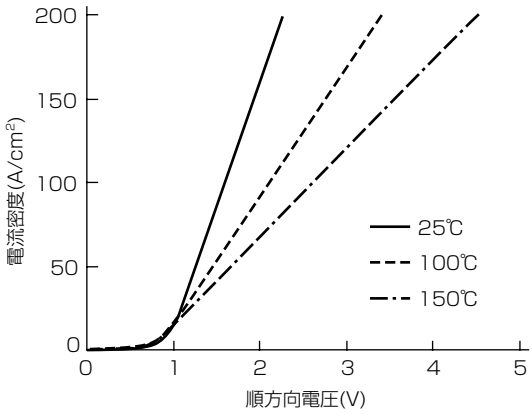


図8．試作SiC−SBDの順方向電流−電圧特性

を示す。3.3kV印加時の耐圧終端部分の(a)電位分布と(b)電界強度分布を示しており，左側がショットキー電極側，右側が素子端部側である。ショットキー電極部と耐圧終端部の境界は，図中でTi電極端と示されているところにある。3.3kV印加時の空乏層の位置も合わせて図中に示している。計算に用いたドリフト層はn型不純物濃度が3×10^{15}個/cm^3，厚みを30μmとしている。

耐圧終端部にイオン注入する不純物濃度を調整して，終端の外側に向けて不純物濃度が実効的に6段階で緩やかに変化するように最適化した。その結果，**図6**に示すように電位分布は緩やかに変化して局所的に高電界になるところはなくなっている。SBDのTi電極端や注入濃度の変動が大きい場所では電界が高めになっているが，その値は2MV/cmや2.3MV/cm程度であり，SiCの絶縁破壊電界強度3MV/cmに対し十分低い電界強度である。この条件で計算した耐圧は4.0kV程度であり，要求される3.3kV耐圧に比べ十分高い耐圧を持った終端構造が実現できると予想される。

3.2　SBDの電気特性

耐圧シミュレーションで最適化した擬似多階調終端構造を適用して耐圧3.3kVのSiC-SBDを開発した。n型4H-SiC基板上に形成したドーピング濃度3×10^{15}個/cm^3，厚み30μmのSiCエピタキシャル膜上にSBDデバイスを形成した。Alのイオン注入で擬似多階調終端構造の形成後，Tiによってショットキー障壁を形成し，表面にAl電極，裏面にNi電極を形成している。

試作したSiC-SBDの温度25℃と150℃の逆方向電流－電圧特性を**図7**に示す。印加電圧に対するリーク電流密度をプロットしている。図に示されるように，25℃と150℃のいずれもほぼ同じ電圧3.9kV近傍で降伏電流が発生している。3.3kVが印加された時の逆方向リーク電流密度は2.4×10^{-4}A/cm^2（25℃）であり，SBDの逆方向電流として予想される値で，異常なリーク電流はなかった。このSiC-SBDの各種温度（25℃／100℃／150℃）における順方向電流-電圧特性を**図8**に示す。25℃と150℃時の電流密度150A/cm^{2}における順方向電圧は，それぞれ1.9Vと3.5Vであり，ドリフト層の不純物濃度と厚みから予想される値になっている。

これらのことから，耐圧終端構造に擬似多階調終端構造を適用したSiC-SBDは3.3kVデバイスとして十分高い耐圧特性が得られていることが分かった。

4. む　す　び

SiCパワーデバイスの高機能化・高耐圧化に向けて開発を進めている。高機能化として電流センス機能を内蔵した1,200V耐圧のSiC-MOSFETを開発した。電流センス機能で過電流を検出して，メイン電流を正常に遮断して素子を保護できることを実証した。また，高耐圧化に向けて耐圧終端構造をデバイスシミュレータによって検討して，耐圧終端部の電界強度を低く抑えて高耐圧特性が得られる擬似多階調終端構造を見いだした。この耐圧終端構造を適用して耐圧3.3kV級の SiC-SBDを開発した。開発したSiC-SBDでは，3.9kV印加時に降伏電流が発生し，3.3kVデバイスとして十分な耐圧特性を持つことを示した。

今後は，今回得られた耐圧終端構造に基づいて，更に素子構造の最適化を進め，MOSFETへ展開するとともに大容量化に向けた開発をおこなっていく。

この研究は経済産業省／NEDO（New Energy and industrial technology Development Organization）から委託された“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”の成果を含んでいる。

参 考 文 献

(1) 中田修平，ほか：SiCパワーデバイス技術とその応用，三菱電機技報，**84**，No.4，215～218（2010）
(2) 中山　靖，ほか：SiC-SBD適用インバータによる鉄道車両用電動機駆動評価，平成22年電気学会全国大会講演論文集，No. 4，233（2010）