

SiC レクチャーシリーズ

12. 高耐圧 SiC チップ技術

高耐圧 SiC チップ技術

SiC を用いることにより定格電圧 3.3kV 以上の高耐圧 MOSFET を実現できます。MOSFET はユニポーラデバイスであるため少数キャリアが蓄積せず、損失の極めて小さいスイッチングを実現できます。一般に高耐圧システムは扱う電流が大きく、かつ、電力損失による発熱を許容値以下に抑える必要からキャリア周波数(スイッチング周波数)を低く設定しますが、SiC MOSFET を用いることにより高いキャリア周波数を用いたシステムが可能になります。これにより高性能化や小形化などの以前にないメリットをシステムに提供することができます。三菱電機は高耐圧 SiC MOSFET を開発と製品化をし、鉄道車両の駆動用インバータなどへの適用を他社に先行して実施しており、現在、市場で多くの実績を持つデバイスメーカーとなっています。

高耐圧の SiC MOSFET はオン抵抗に占めるドリフト層および JFET 領域の抵抗の割合が大きいです。ドリフト層の抵抗は耐圧および物性値から決まるため、設計を工夫することにより低減することは困難です。このため、低抵抗化には JFET 領域の最適化設計が重要となっています。JFET 領域の設計では抵抗の低減と同時に信頼性確保のための最大電界の抑制も必要です。第 11 講に記した第二世代 SiC MOSFET の開発で得た JFET ドーピング技術を駆使することにより、抵抗の低減と高信頼性を両立させた 3.3kV SiC MOSFET を実現しました。加えて、高耐圧 SiC MOSFET で配慮が必要な性能に短絡耐量があります。印加する電圧が高い場合、短絡故障からデバイスを保護するには短絡電流をさらに抑える必要があります。SiC MOSFET では、短絡時の電流の抑制はオン抵抗の増加を伴うため、これらの特性のバランスを考慮した設計が必須となっています。

図 1 に 3.3kV SiC MOSFET を搭載したモジュールの順方向特性を示しています。図には SiC MOSFET と同じ有効面積をもつとした場合の Si IGBT の順方向特性も示しています。電流が低い領域では立ち上がり電圧が存在する Si IGBT と比較し、SiC MOSFET ではオン電圧が大幅に抑えられています。これは SiC MOSFET の大きなメリットの一つと言えます。

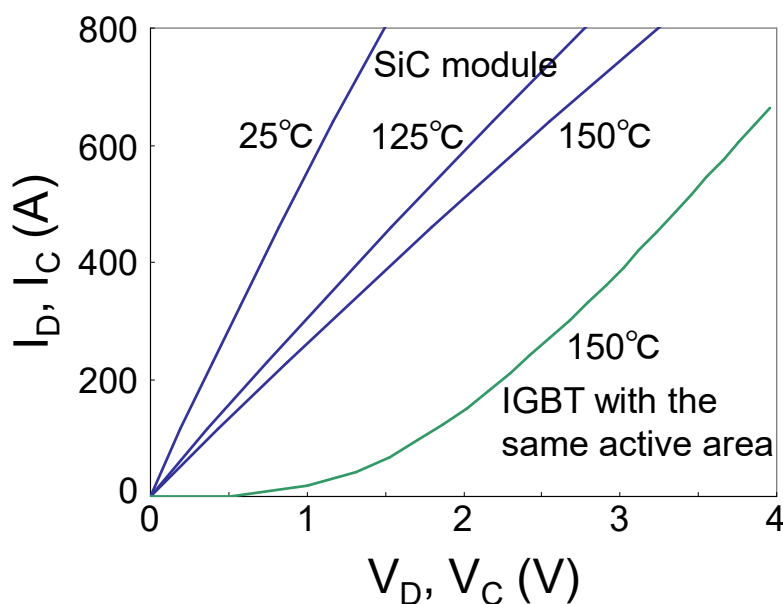


図 1 3.3kV SiC MOSFET を搭載したモジュールの順方向特性

三菱電機では、次世代の高耐圧 SiC MOSFET として、第三世代品である SBD 内蔵 SiC MOSFET を開発しており、それを搭載した最初のモジュールを 2024 年に製品化しました。第 5 講で述べたように、SiC の結晶中にはバイポーラ電流を流すことによってデバイス特性を劣化させる結晶欠陥が数は少ないものの存在します。チップの並列数が多い高耐圧・大電流モジュールではこの欠陥を含む確率が高くなるため、通常の動作時にはバイポーラ電流が流れないようにショットキーダイオードを MOS セル内に内蔵した SiC MOSFET を対策として開発しました。

SBD 内蔵 SiC MOSFET の断面構造図を通常の MOSFET と比較して図 2 に示します。SBD 内蔵 SiC MOSFET ではソース電極とコンタクトを形成している部分の一部にショットキー電極を形成しています。MOSFET に逆方向電圧がかかった時にショットキー電流(ユニポーラ電流)を流すことでボディダイオードによるバイポーラ電流を抑えています。図 3 に SBD 内蔵 SiC MOSFET の順方向特性を示します。順方向のドレイン電流とドレイン電圧の特性は通常の SiC MOSFET の特性と変わりません。

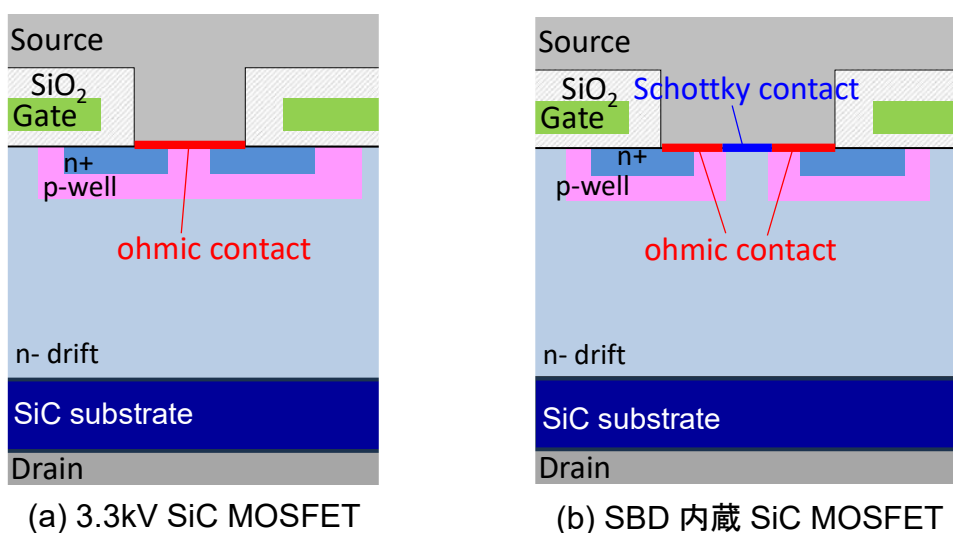


図 2 MOS セル断面の構造図

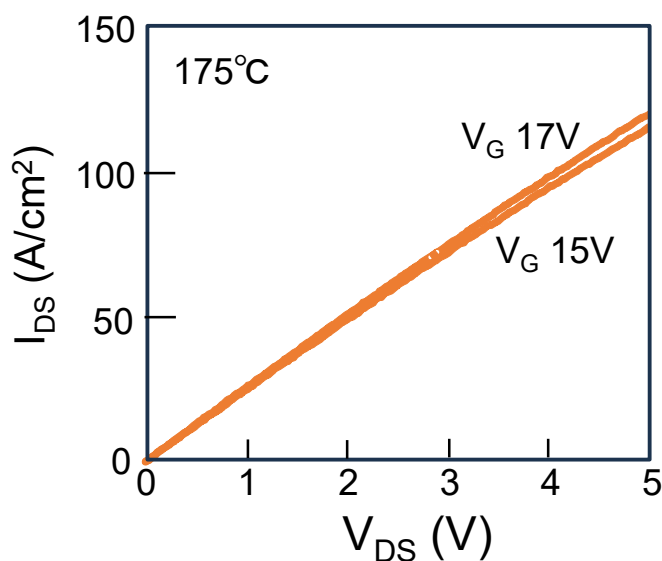


図 3 SBD 内蔵 SiC MOSFET の順方向特性

図 4 に SBD 内蔵 SiC MOSFET の逆方向特性を示します。ゲートをオフした状態で、MOSFET に逆方向電圧を印加すると通常構造では約 2.5V を超えたところで MOSFET のボディーダイオードによるバイポーラ電流が流れています。それに対し SBD 内蔵 SiC MOSFET では約 1V からユニポーラ電流のショットキー電流が流れており、ボディーダイオードによる電流が流れていません。このためバイポーラ通電による劣化が生じることはありません。

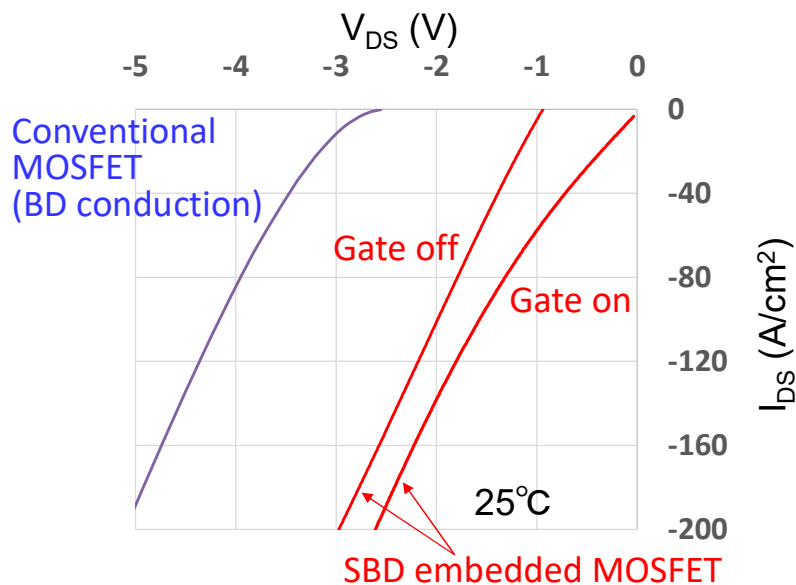


図 4 SBD 内蔵 SiC MOSFET の逆方向特性

SBD 内蔵 SiC MOSFET の課題としてサージ電流耐量が低いことがあげられていました。これに対し、三菱電機は、サージ電流が流れた際にのみバイポーラ動作をする独自の MOS セル構造を開発しました。この MOS セルを SBD 内蔵 SiC MOSFET に組み込むことでサージ電流耐量を大きく向上することに成功しました。

以上
2025 年 1 月