

大容量・高耐熱 SiC ツェナーダイオードの開発について ～100 kVA 級 オール SiC インバータでの動作確認に世界で初めて成功～

この度、関西電力株式会社（取締役社長：森詳介、本社：大阪府北区）と財団法人電力中央研究所（理事長：白玉良一、本部：東京都千代田区）は共同で、次世代半導体素材として期待されているシリコンカーバイド（SiC）を用いた「サージ電圧吸収用高耐熱ツェナーダイオード」を開発しました。

パソコンや家電製品の制御装置には、落雷や故障による過電圧（サージ電圧）で破損するのを防止する保護回路などに、「ツェナーダイオード」が広く用いられています。このツェナーダイオードは一般のダイオードと異なり、逆方向電圧をかけていくと、ある端子電圧（ツェナー電圧）で通電を初め、その流れる電流の大きさに関係なく、端子電圧が一定に保たれるという特性を持っています（注 1）。このため、ツェナーダイオードを保護する電子回路と並列に設置することで、その電子回路の端子電圧が一定以下に保たれ、過電圧による破損を防ぐことができます。

しかしながら、現在市販され、広く利用されているシリコン（Si）単結晶を母材とした Si ツェナーダイオードは、使用可能な温度が約 180℃以下と低く、また温度上昇に伴ってツェナー電圧が上昇してしまうという問題があり、広い温度範囲で安定な保護動作を行うことができませんでした。

そこで、今般、高い耐熱性を有する SiC 単結晶の優れた特性に注目し、ツェナー電圧の温度依存性が小さく、高温になってもツェナー電圧が変化せずに安定に動作できる SiC ツェナーダイオードを開発しました。

具体的には、

- ① 関西電力において、ダイオード素子周辺部に独自のメサ JTE 電界緩和領域（注 2）を設けた構造を立案し、デバイスシミュレーションを用いて最適設計を行い pn 接合全面に均一に降伏電流を流すのに成功したこと
- ② 電力中央研究所における高品位 SiC エピタキシャル成長技術（注 3）を用いて、低い結晶欠陥密度で素子の大面积化（素子面積 16 mm²）を可能とし、かつ高濃度の pn 接合を数十 nm の範囲内で急峻に濃度変化させて形成することでツェナー電圧の制御に成功したこと
- ③ ①と②により安定動作を可能にした素子を電力中央研究所にて製作し、関西電力にて高耐熱パッケージに実装することにより、ツェナー電圧が数十 V（20 V 以上）で、最大通電容量（パルス幅 1 ms）が 6.3 kW の大容量 SiC ツェナーダイオードを実現したものです。

SiC ツェナーダイオードにおいて、このような実機に搭載可能なレベルの大容量化に成功したのは世界で初めてとなります。

開発した SiC ダイオードの特性は表 1 のとおりです。最高動作温度は 300℃以上で、Si ツェナーダイオードよりも 100℃以上高い温度での保護動作が可能です。

ツェナー電圧の温度依存性は $5.7 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ で、Si ツェナーダイオードよりも約一桁小さく、温度変化に対するツェナー電圧の変動が極めて小さいものとなっています。

最大通電容量密度（単位面積あたりの最大通電容量）は 40kW/cm² で、Si ツェナーダイオードよりも 2 倍以上大きく、素子を設置した際の専有面積を小さくできることから、コンパクトな実装が可能となります。

表 1 開発した SiC ツェナーダイオードの特性（Si との比較）

	SiC ツェナーダイオード	Si ツェナーダイオード
最高動作温度	300℃	175℃
最大通電 容量密度	40kW/cm ²	16kW/cm ²
ツェナー電圧の温度 依存係数	$5.7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

今回開発した SiC ツェナーダイオードは、高温で動作する SiC スイッチング素子と同一パッケージに搭載することができることから、インバータのコンパクト化を図ることができます。また、高温においても、素子を誤動作なく、大きなサージから保護することができるので、インバータの信頼性が向上します。

今般、関西電力と電力中央研究所にて共同開発した SiC ツェナーダイオードを、関西電力が開発した「100 kVA 級オール SiC インバータ」(注 4) に SiC スイッチング素子のゲート回路の保護素子として搭載し、実際にインバータ試験を実施しました。この結果、SiC スイッチング素子のゲート回路の保護に成功し、実規模での使用についても実証することができました。

SiC ツェナーダイオードは、高温下でも安定して動作する素子として、将来的には、高機能化するパソコンなどの家電製品、自動車、産業機器から電力制御機器などにおいて、広く活用されることが期待できます。

今回の成果は、実機レベルでの動作検証までの素子性能実証に成功したもので、その実用化に向けての大きなステップと考えられます。

今回は具体的なコスト等に関する検討にまでは至っておりませんが、今後 SiC 単結晶ウエハが低廉な価格で市場に提供されるようになれば、製品化され普及することが見込まれます。

以 上

※注 1

ツェナーダイオードの比較的低い電圧で一定になる特性をブレイクダウン（降伏）と呼ぶが、このとき流れる電流に無関係に電圧は一定になる。

※注 2

高電圧 pn ダイオードの pn 接合終端部での電界集中を緩和して、高い電界まで電圧を保持できるようにするための構造で、メサ形状エッチングとイオン注入工程を組み合わせ加工される。

※注 3

電力中央研究所では、独自の縦型 SiC エピタキシャル成長装置を開発し、低欠陥密度のエピタキシャル膜を得ることに成功している。

※注 4

関西電力では、電力制御などへの適用を目指し、大容量のオール SiC インバータの開発を進め、これまでに世界最大となる 184kVA のインバータ動作の実証に成功している。