



Title	高耐圧4H-SiC pnダイオードの開発とその効果
Author(s)	緒方, 修二
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/27561">https://hdl.handle.net/11094/27561</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

【149】

氏名	緒方 修二		
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)		
学位記番号	第 26215 号		
学位授与年月日	平成 25 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科電気電子情報工学専攻		
学位論文名	高耐圧 4H-SiC pn ダイオードの開発とその効果		
論文審査委員	(主査) 教授 伊瀬 敏史 (副査) 教授 舟木 剛 教授 高井 重昌 教授 谷野 哲三 教授 白神 宏之 准教授 三浦 友史		

## 論文内容の要旨

パワーエレクトロニクス技術は重要性を増しており、パワーエレクトロニクス装置に用いられるパワー半導体素子は、スイッチング損失および導通損失の低減、高耐圧化、高温動作化など、さらなる高性能化が要求されている。このため、スイッチング素子に関しては種々の構造が提案され、これらの取り組みによりスイッチング素

子の特性は改善されてきた。一方、ダイオードの特性改善は、材料である Si の物性限界に直面し、困難な状況になっている。この Si の物性限界を打破して飛躍的な特性改善を図るためには、Si に比べて優れた物性値を持つワイドギャップ半導体を用いたダイオードを開発することがきわめて有効な手段であると考えられる。

日本国内においては、SBDやFETなどのユニポーラ素子の研究が盛んに行われている。しかし、ユニポーラ素子では、オン抵抗が耐圧の2~2.5乗に比例して大きくなる。そのため、高電圧分野でのSiC素子の応用には、少数キャリア注入による伝導度変調効果が期待できるバイポーラ素子が用いられると考えられる。バイポーラ素子には、pnダイオード、バイポーラトランジスタ、IGBT、GTOなどがある。バイポーラ素子では、少数キャリア蓄積効果によりオン抵抗は低減されるが、ターンオフ時には逆回復電流が流れ、スイッチング時間とスイッチング損失が増大する。ユニポーラ素子とバイポーラ素子の棲み分けとしては、SiC素子の場合、耐圧3~5 kVまではユニポーラ素子でも低オン抵抗を実現できるため、SiCバイポーラ素子の適用範囲は5~10 kV以上の高耐圧領域と考えられる。

電力分野における直流送電や、周波数変換等には大容量の電力変換装置が用いられており、これらの装置には高耐圧・大容量で低損失なパワー半導体素子が必要である。SiCバイポーラ素子はこうした分野に適しているが、日本国内ではSiCバイポーラ素子の開発はあまり行われていない。

本研究においては、SiC pnダイオードを開発すると共に、SiC pnダイオードを電力変換装置へ適用した場合の効果を評価することを目的とした。

本論文は、これらの背景と目的より動機づけられた一連の研究から得られた成果をまとめたもので、6つの章から構成される。

第1章では、本研究の背景として、パワー半導体への要求事項とSiC半導体の特徴と期待される効果を述べると共に、技術課題を示し、本研究の目的を明確に位置づけた。

第2章では、高耐圧SiC pnダイオードを設計・試作し、その静特性、逆回復特性および過渡順特性を測定評価した結果について述べた。静特性の測定では、バイポーラ素子の特徴である伝導度変調が起こっていることを確認した。また、過渡順特性のデータから、試作したダイオードの順電圧が、接合温度にかかわらず、最適値付近の値を保つことを確認した。

第3章では、平型4H-SiC pnダイオードを設計・試作し、その静特性、逆回復特性および熱特性を測定評価した結果について述べた。静特性については、平型4H-SiC pnダイオードとSiC SBDの、順電圧と導通損失の比較を行った。逆回復特性については、平型4H-SiC pnダイオードと2.5 kV級Si-IGBTモジュール内蔵FWDの損失を比較した。熱特性については、平型4H-SiC pnダイオードと平型Siダイオードの許容可能なパルス負荷を比較した。

第4章では、SiC pnダイオードのサージ電流耐量を測定評価した結果について述べた。

第5章では、無効電力を発生するSTATCOM用IGBTインバータの冷却フィンをも簡素化するために、平型4H-SiC pnダイオードを、4.5 kV Si-IGBTと組み合わせる構成が、冷却系に与える効果を検討した。

第6章では、本研究から得られた成果を総括すると共に、今後の課題を述べた。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、SiC pn ダイオードを開発すると共に、SiC pn ダイオードを電力変換装置へ適用した場合の効果を評価することを目的とした研究をまとめたものである。パワーエレクトロニクス技術は重要性を増しており、その装置に用いられるパワー半導体素子は、スイッチング損失および導通損失の低減、高耐圧化、高温動作化など、さらなる高性能化が要求されている。このため、スイッチング素子に関しては種々の構造が提案され、これらの取り組みによりスイッチング素子の特性は改善されてきた。一方、ダイオードの特性改善は、材料である Si の物性限界に直面し、困難な状況になっている。この Si の物性限界を打破して飛躍的な特性改善を図るためには、Si に比べて優れた物性値を持つ SiC などのワイドバンドギャップ半導体を用いたダイオードを開発することがきわめて有効な手段であると考えられる。日本国内においては、ショットキーバリアダイオード(SBD)やFETなどのユニポーラ素子の研究が盛んに行われている。しかし、ユニポーラ素子ではオン抵抗が耐圧の2~2.5乗に比例して大きくなる。そのため、高電圧分野での

SiC 素子の応用には、少数キャリア注入による伝導度変調効果が期待できるバイポーラ素子が用いられると考えられる。ユニポーラ素子とバイポーラ素子の棲み分けとしては、SiC 素子の場合耐圧 3~5 kV まではユニポーラ素子でも低オン抵抗を実現できるため、SiC バイポーラ素子の適用範囲は 5~10 kV 以上の高耐圧領域と考えられる。バイポーラ素子では、少数キャリア蓄積効果によりオン抵抗は低減されるが、ターンオフ時には逆回復電流が流れ、スイッチング時間とスイッチング損失が増大する。バイポーラ素子には、pn ダイオード、バイポーラトランジスタ、IGBT、GTO などがあるが、本論文では pn ダイオードに焦点を当て、素子のチップ単体の開発から平型素子の開発、さらに応用面から見た特性の評価までの研究をまとめている。本研究で得られた成果は以下で要約される。

1) 従来のメサ型やプレーナ型 JTE(Junction Termination Extension)に代わる新構造のメサ JTE 構造を持つ SiC pn ダイオードを設計・試作し、その静特性、逆回復特性および過渡順特性を測定評価した結果、静特性の測定では、5kV の耐圧とバイポーラ素子の特徴である伝導度変調が起こっていることを確認している。また、過渡順特性から、試作したダイオードの順電圧が接合温度にかかわらず最適値付近の値を保つことを確認している。

2) 開発した SiC pn ダイオードを 5 チップ並列接続した平型 4H-SiC pn ダイオードを設計・試作し、その静特性、逆回復特性および熱特性を測定評価している。静特性については、平型 4H-SiC pn ダイオードと SiC SBD の順電圧と導通損失の比較を行っている。逆回復特性については平型 4H-SiC pn ダイオードと 2.5 kV 級 Si-IGBT モジュール内蔵ダイオードの損失を比較している。熱特性については平型 4H-SiC pn ダイオードと平型 Si ダイオードの許容可能なパルス負荷を比較している。これらの結果により開発した SiC pn 平型ダイオードが優れた特性を持つことを示している。

3) 開発した SiC pn ダイオードのサージ電流耐量を測定評価した結果について述べ、優れたサージ電流耐量を有することを示している。

4) 無効電力を発生する STATCOM 用 IGBT インバータの冷却フィンを簡素化するために、開発した平型 SiC pn ダイオードと 4.5 kV Si-IGBT と組み合わせる構成が冷却系に与える効果を検討し、その優位性を示している。

以上のように、本論文は開発した SiC pn ダイオードについて素子単体だけでなく、応用面からも優位性を明らかにし、この分野の技術の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。