

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：高性能 SiC パワーデバイスを活用した大電力パルス電源小型化のための研究
- (2) 研究代表者：株式会社日立製作所 島 明生
- (3) 研究期間：令和元年度～令和5年度

2. 終了評価の実施概要

実施日：令和6年11月26日

場所：TKP秋葉原カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽（委員長）

東京農工大学 名誉教授

宇野 亨

情報通信研究機構 主席研究員

門脇 直人

慶應義塾大学 名誉教授

笹瀬 巖

元 東海大学 教授

森本 雅之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

高絶縁破壊電界強度、高熱伝導度で優れた特性をもつ SiC を用いた耐圧 10 kV 級高耐圧スイッチングデバイスをエピウエハ、デバイス設計両面から検討する。得られたデバイス特性を基に大電力パルス電源のミニモデルを作製、性能を検証し、従来の Si デバイスでは達成できないパルス電源小型・高性能化の基礎技術を確立する。

成果の概要

- ① SiC IGBT デバイスを試作、耐圧 10kV@1.4mA/cm²、オン電圧 5V@100A/cm² を達成し、スイッチング動作を達成した。耐圧 10kV、パルスピーク電流 1kA、パルス幅 10ms のパルス動作を実証した。
- ② C 面を用いたジャスト基板上エピ成長で 4μsec の少数キャリアライフタイムを達成した。エピ膜品質評価用 SiC サイリスタを設計試作し、耐圧 11.8kV、オン電圧 11V@100A/cm² を実証した。

- ③ 電流密度 $1\text{kA}/\text{cm}^2$ 以上の SiC-IGBT の大電流動作を想定したキャリア再結合モデルを構築し、n-層（耐圧維持層）および p 型層（コレクタ層）のキャリアライフタイムの過剰キャリア密度依存性のモデルを得た。

4. 終了評価の評点

AA 想定以上の成果をあげた。

5. 総合コメント

耐圧 10kV、パルスピーク電流 1kA という大電力パワーデバイスを実用サイズで製作するとともに、設定した研究目標をすべて達成し、優れた学術的成果も挙げており、高く評価できる。予想しなかった結晶欠陥などのミクロ的な知見も得られ、近い将来、実用化される可能性のあるデバイスの基礎技術としても、成果を高く評価できる。

パルス電源以外への展開には改良が必要であるが、今後の発展の可能性も十分に認められる。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

- ① 大電力パルス電源用高耐圧 SiC スイッチング素子開発に対し、以下の目標をすべて達成した。

- ・耐圧 10kV 以上
- ・ターンオフ時の電流立下り時間 50ns 以下
- ・オン電圧 5V 以下 (150°C 、コレクタ電流 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 時)
- ・コレクタ電流 $100\text{A}/\text{cm}^2$ を 1000 時間通電時のオン電圧の変動が 1%以下
- ・ミニモデルによるパルス出力評価：パルスピーク電流 1kA（パルス幅 10ms）

- ② ジャスト基板を用いたエピ膜成長技術に対し、以下の目標をほぼ達成した。

- ・3C インクルージョン密度 < 0.2 個/ cm^2 以下
- ・キャリアライフタイム $2\mu\text{sec}$ 以上
- ・PIN ダイオードを作製することによりエピ膜の品質評価

3C インクルージョン密度の低減については 0.8 個/ cm^2 の達成にとどまり、目標達成に至らなかった。ただし、残存する 3C インクルージョン発生原因については、膜成長途中のパーティクルが原因であることは解明できており、炉内のグラファイト部材を定期的にクリーニングすることで 0.2 個/ cm^2 以下に低減する技術的な目途をつけることができた。その他の目標については達成した。

- ③ SiC エピ膜中の結晶欠陥のモデル化ならびにキャリアライフタイム制御技術に対し、SiC デバイスの大電流パルス出力性能を向上することを目的とした SiC エピ膜中の結晶欠陥のモデル化ならびにキャリアライフタイム制御技術に関する基礎研究を実施し、SiC エピ膜のキャリアライフタイムを制御する再結合中心ならびに SiC デバイスの電流出力性能を低下させる SiC エピ膜中の積層欠陥を対象として、それらの物理的パラメータを実験的に求めた。得られたパラメータを用いて、キャリア再結合と積層欠陥のモデル化を行い、大電流パルス出力（ $1\text{kA}/\text{cm}^2$ 以上）SiC デバイスの性能向上に対する指針を得た。計画通りに進捗し、研究開始時に設定した研究目標を達成した。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

- ・ 10kV 耐圧の SiC IGBT デバイスを作製し、最終目標はすべて達成できており、優れた研究成果を上げている。
- ・ 10kV、1kA の動作を実証したので、研究目標は達成している。

6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

パルス電源動作ではチップサージ電流（連続動作）以上の電流耐性があることを見出した。今後、連続パルス動作及び繰り返し周波数依存性評価で詳細メカニズムを明らかにする。

バイポーラ型パワーデバイスのオン特性に大きな影響を及ぼす少数キャリアライフタイムについて、ジャストエピ技術にライフタイム改善プロセスを適用することで、当初の目標（ $2\mu\text{sec}$ ）に対して倍の値である $4\mu\text{sec}$ を達成した。本成果は、ジャストエピ技術を、超高耐圧 SiC パワーデバイスを実用化する際のキーテクノロジーになることを示しており、今後さらなる性能改善を目指していく予定である。

バイポーラ型 SiC デバイス（PIN ダイオード、IGBT）の通電中に拡大するタイプの積層欠陥（1SSF）の影響度の研究が、1SSF が通電特性劣化を引き起こすメカニズムの解明や、他種の積層欠陥の影響度の解明、ユニポーラ型 SiC デバイス（SBD、MOSFET）に対する 1SSF の影響度の解明にまでつながった。

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- ・ ノウハウに類する知見を多く得ている。
- ・ 電流耐性も高いことが明らかになったことで応用分野が広がった。
- ・ 特性劣化のメカニズム解明などの成果があることは学術的にも有益である。
- ・ パルス電源動作では、チップサージ電流以上の電流耐性がある可能性を見出している。
- ・ 予想しなかった知見も得られた。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

特になし

【個々の委員によるコメント】（間接的成果）

なし

6-4. 科学技術上特筆すべき成果

SiC バイポーラデバイス（IGBT, PIN ダイオード）を、実用化可能レベルの性能レベルでの研究開発に初めて成功するとともに、ドリフト層局所ライフタイム変調の効果を実証した。

3C インクルージョン密度のみ目標未達となったが、高耐圧 SiC パワーデバイスの実現のため、厚膜エピ品質の向上は最も重要な課題であり、今回取り組んだジャストエピ成長技術は、その中でも期待の高い技術であることは実証できた。

SiC 結晶中の各種積層欠陥（ISSF、他）が SiC デバイスの通電特性に与える影響度を定量的に明らかにするとともに、積層欠陥に対する量子井戸モデルを構築することで、積層欠陥を含む SiC デバイスの通電特性のシミュレーション予測を可能とした。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）

- ・ SiC ではチャンピオンデータとなっている。
- ・ パルス電源定格 10kV/1kA を実現したことは特筆に値する。また、幾つかの学術的な成果を挙げている。
- ・ 積層欠陥をふくむ通電特性のシミュレーション予測が可能になったことは有意義である。
- ・ SiC バイポーラデバイスドリフト層における局所ライフタイム変調の効果を実証している。
- ・ 高耐圧 SiC のための結晶欠陥などのミクロ的な知見が得られた。

6-5. 論文（投稿中のものも含む）、学会発表等

学術論文 8 件 学会発表 18 件

6-6. 特許（出願中のものも含む）

出願中： 国内 4 件

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究成果）

- ・ 十分な数の学術論文と研究発表がある。今後もさらに発表されることを期待する。
- ・ 特許申請は、研究成果を考えるともう少しあってもよい。積極的に申請されることを期待する。

6-7. 科学技術への波及効果

パルス電源用途のみならず、洋上風力、EV 急速充電器、電気推進船、電動飛行機、直流データセンタ、高電圧直流送電や各種産業機器等電力ネットワーク機器への適用を検討し、低炭素社会実現に貢献する。

低炭素社会の実現に向けて温暖化ガス排出量を 2050 年に実質ゼロにするグリーン成長戦略が決定された。その中で、2050 年には再生可能エネルギーの比率を今の 3 倍の 50－60%に高める、また 2030 年代半ばまでに、乗用車新車販売で EV100%を実現するという目安が示されている。再生可能エネルギーのなかでも太陽光や風力発電などは自然現象をエネルギー源としている性質上、化石燃料による発電と比べて出力変動が大きい。そして、多数の電動化モビリティが電力ネットワークに接続して双方向の電力融通をするようになると、やはり電力変動が大きくなる。既存の電力ネットワークはそのような出力変動に弱いという課題がある。

電力ネットワーク機器の小型化・軽量化・高信頼化は、高耐圧・高周波対応可能なパワーモジュールを適用して、商用周波数のトランスを削減することによって実現する。そのようなパワーモジュールは、SiC デバイスのスイッチング損失と導通損失のトレードオフ改善による性能革新によって実現する。複数の低耐圧向けフルブリッジインバータの直列接続によっても高耐圧化が可能であるが、この場合は部品点数が多くなってしまい、サイズやコストの増大が避けられない。また、高耐圧 SiC-MOSFET は高周波化の観点で SiC-IGBT より有利であるものの、導通損失が大きいいため、大電力用途では SiC-IGBT が有利である。一方、高耐圧 SiC-IGBT を適用した場合の低コスト化については、トランスレス化やモジュール数削減などのプラスの効果があるものの、SiC 適用によるコスト増にも対応する必要がある。今後、低コスト SiC-IGBT デバイスの量産技術を確立するとともに、電力ネットワークにつながるシステムを社会実装するためにはシステム信頼性確保が重要であるため、その構成要素であるモジュール信頼性、デバイス信頼性技術を確立して製品化へとつなげていく。

【個々の委員によるコメント】（発展性と波及効果）

- ・ 電源の小型化以外にまだ有力な使途は見えていない。
- ・ 今後の様々な民生分野に高い効果が期待できる。波及効果も大きい。
- ・ 実用化の可能性のあるデバイスができたことは、今後の波及効果が期待できる。
- ・ 15kV へのチャレンジが社内的には始まっている。
- ・ 実用化に向けて企業とのディスカッションを行うなど、発展性につながる活動がされている。

6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、プロジェクト全体の進捗状況を確認し、2か月に一回の割合で進捗報告会を実施した。本委託業務の実施により得られた成果について、学会発表、学術論文の投稿、特許出願を行ない、本研究の更なる進展に努めた。

【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）

- ・ 3機関の連携が実った。
- ・ コロナ禍での制限はあったが、ほぼ適切に実施した。

6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

プロジェクト開始とほぼ同時に、COVID-19 緊急事態宣言による出社制限、材料調達の不透明化・長期化に直面し、研究スケジュールの大幅な見直しを余儀なくされた。

材料調達に関しては複数社からの調達を進めること、出社担当者を交代制で進めること、令和2年単年ではなく令和3年との2ヵ年で挽回できるよう計画を見直すことによりプロジェクトを進め、中間目標及び最終目標を達成した。

【個々の委員によるコメント】（研究推進時に生じた問題への対応）

- ・ コロナ禍での制限はあったが、ほぼ適切に実施した。

6-10. 経費の効率的な執行

特記事項なし。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

- ・ 適切であると考ええる。