

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06334

研究課題名(和文)次世代半導体を用いた新しいモジュール型スイッチの開発

研究課題名(英文)Development of a new module type switch using next generation semiconductors

研究代表者

高柳 智弘 (Tomohiro, TAKAYANAGI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究主幹

研究者番号：10354755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高周波特性に優れ低損失な次世代パワー半導体の一つであるSiC製のMOSFETを用いて、大電力高速短パルス出力を可能とするモジュール型スイッチ回路の設計と製作を進めた。本スイッチは、大電流化に必要な回路の並列化において、回路配列を電流伝搬時間と回路インピーダンスに差が無い等長回路の放射対称型で構成した。更に、高電圧化に伴うモジュール基板の直列多段接続時の基板間の電流伝搬回路の形状を円リング環状型路とし、高速短パルスの出力特性に有意な低インダクタンス化も実現した。開発したモジュール型スイッチ回路は、実験と解析の両面から、出力パルス波形において歪みが小さく理想的な急峻形状を実現したことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パワー半導体デバイスの技術開発は、重電メーカーや電力機器メーカーの分野である。しかし、SiC製のパワー半導体デバイス技術の開発は始まった段階であり世界中で市場がまだ形成されていない。本研究はパワー半導体の高性能化に伴い、これまでの電力変換器やパルス電源などの利用に限られた半導体デバイス技術の枠を超え、従来の性能では実現不可能であった高電圧、大電流、高速動作の性能が要求される放電型スイッチからの置換を見据えた産業技術の高度化へと展開ができる。本スイッチ回路の開発成果は、半導体デバイスの需要拡大を促し、更に、スイッチ回路の開発をメーカーに勧奨する意義をもたらす。

研究成果の概要(英文)：A modular board of the switch circuit that enables high-power, high-speed, and short-pulse output by using SiC-MOSFET, which is one of the next-generation power semiconductors with excellent high-frequency characteristics and low loss has been designed and fabricated. In this switch, the circuit arrangement is a radial symmetric type of equal-length circuit with no difference in current propagation time and circuit impedance when paralleling the circuits required for large current. Moreover, the shape of the current propagation circuit between the boards connected in multiple stages in series has been changed to a ring-shaped type path, and a significant reduction of the inductance has been realized. From both experiment and analysis, it was confirmed that the developed module type switch circuit realized an ideal steep shape with little distortion in the output pulse waveform.

研究分野：電気電子工学

キーワード：半導体デバイス SiC スイッチ回路 モジュール基板 高電圧 大電流 パルス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

医療用や研究用などの加速器電源装置は、出力波形の立ち上がり時間が数 10 ナノ秒の高速性と数十 kV 以上且つ数 kA 以上の高電圧大電流を有する大電力パルスを出力する。そのため、放電管型のイグナイトロンやサイラトロンを用いて負荷保護回路やパルス電源を構築している。しかし、イグナイトロンは水銀を使用しており、環境への影響から安定した受注が困難になると予想されている。また、サイラトロンは管内のガス圧調整が必要な上、突然不安定な動作を発する場合があるため寿命評価が難しい。以上のことから、安定した装置の運転と優れたメンテナンス性(長寿命)を備えたパワー半導体を用いたスイッチの開発が急務となっている。現在主流のシリコン(Si)製パワー半導体の IGBT より耐電圧特性と高周波特性が優れているシリコンカーバイド(SiC)を用いた次世代半導体が誕生した。既存の放電管スイッチを半導体スイッチに置換する研究開発が積極的に進められている。

### 2. 研究の目的

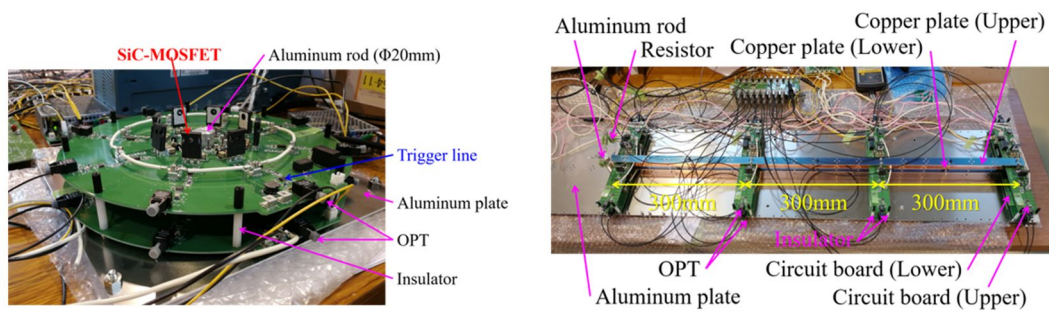
Si 製 IGBT を用いた半導体スイッチは、パルス出力波形の立ち上がり時間においてマイクロ秒程度が限界である。そのため、置換が求められている加速器装置用放電管スイッチの仕様を満足することはできない。また、これまでに製作された半導体スイッチの多くは、主回路の構造・構成が対象とする装置の仕様に合わせた専用設計になっていることから汎用性が無い。そして、今後、より高性能なパワー半導体が誕生した場合は要求される大容量の半導体スイッチを設計することは可能である。しかし、求められたパルス出力特性を満足するためには、半導体スイッチの性能に依存しない部分として、回路構成と周辺回路の最適化による低ノイズ、低インダクタンス、等しい回路インピーダンスの実現が必要となる。

以上のことから、高周波特性に優れ低損失な次世代半導体の一つである SiC 製のパワー半導体を使用し、汎用性が高く且つ回路構成等がパルス出力用に最適化されたモジュール型の新しい半導体スイッチの開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

次世代半導体として開発されている SiC-MOSFET の仕様は、商業用で使用される 1200V / 100A クラスが主流である。その為、高電圧・大電流の大容量化には素子の直並列多重化回路が必須である。並列回路の配置において、通常対称型と異なり放射状に配列すると、各回路から出力された電流の伝搬距離と時間及び回路寄生の成分を等しくすることができる。本構造は対称化と等長化を備えており、スイッチ動作のタイミング制御だけでは調整が不可能な回路インピーダンス差に起因したリップルノイズを構造的に抑制することが可能となる。

- (1) 設計開発した新しい放射対称型と一般的な線対称型の 2 種類の回路基板を用意し、構成と伝搬距離の違いによる出力波形形状の特徴を実測した。回路インダクタンスが小さく、且つ、インピーダンスが等しい場合は急峻に変化し、且つ、波形形状歪の乱れも小さくなる。放射対称型回路と線対称型回路それぞれの出力波形を測定し比較試験をおこなった。線対称型回路については、隣り合う並列回路間の距離を 50mm と 300mm の 2 パターンを用意し、同型で伝搬距離が異なる条件を追加して試験を行った(図 1 参照)。



【放射対称型回路の2段(電圧2倍)試験】

【線対称型回路の距離300mm試験】

図 1. 放射対称型回路と線対称型回路の比較試験

- (2) 高電圧化の為にはモジュール基板を直列多段に階層する構造が必要になる。その為、高速パルス出力には基板間の伝搬回路の低インピーダンス化がポイントになる。伝搬回路の導体構造として、並列回路毎に取り合う支柱型と、並列回路を一体型とした環状同軸型の 2 種類の導体を用意した。構造設計には、2次元の電磁場解析ソフトを用いた。インピーダンスの解析結果と実測結果を比較し、導体構造の違いによる低インピーダンス回路の評価を行った(図 2 参照)。

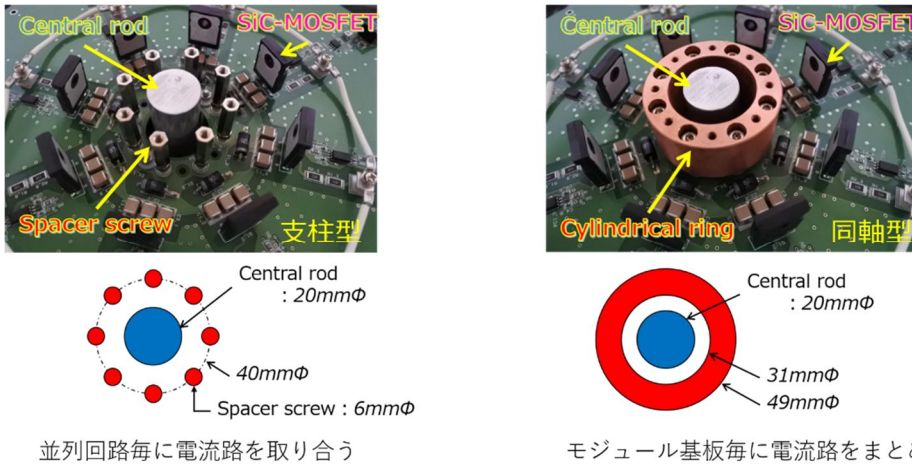


図2．支柱型導体と同軸型導体の比較試験

#### 4．研究成果

高周波特性に優れ低損失な次世代パワー半導体のSiC-MOSFETを用いて、大電力高速短パルス出力を可能とするモジュール型スイッチ回路の設計と製作を進めた。大電流化には回路の並列化が必要であるため、回路配列を電流伝搬時間と寄生インピーダンスに差が生じない放射対称型で構成した。その結果、より高速且つ低ノイズを実現した(図3参照)。更に、高電圧化にはモジュール基板の直列多段接続が必要であるため、基板間の電流伝搬回路の形状を環状同軸型路とした。その結果、高速短パルス特性に有意な低インダクタンス化も実現した(図4参照)。

パワー半導体デバイスの技術開発は、重電メーカーや電力機器メーカーの分野である。しかし、SiC製のパワー半導体デバイス技術の開発は始まった段階であり、世界中で市場がまだ形成されていない。本研究はパワー半導体の高性能化に伴い、電力変換器やパルス電源などに限られた半導体デバイス技術使用の枠を超え、従来の性能では実現不可能であった高電圧、大電流、高速動作が必要とされる放電型スイッチからの置換を見据えた産業技術の高度化への展開を可能とした。本スイッチ回路の開発成果は、半導体デバイスの需要拡大を促し、更に、スイッチ回路の開発をメーカーに勧奨する意義をもたらす。

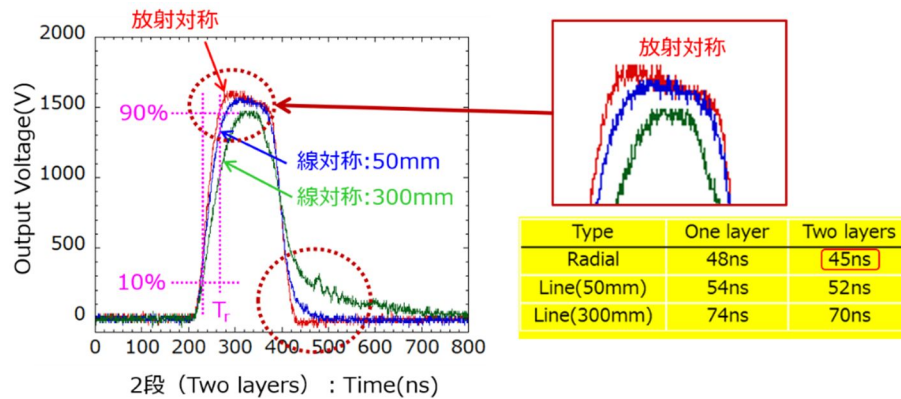


図3．放射対称型回路と線対称型回路の比較試験結果

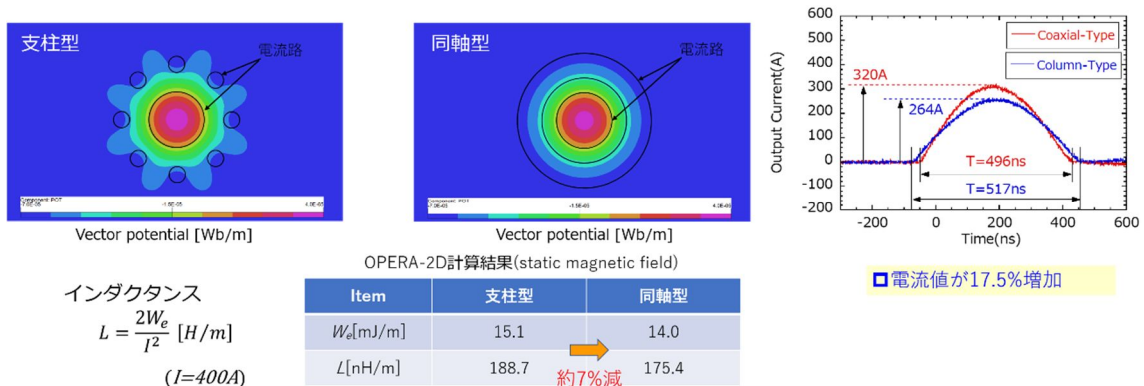


図4．支柱型導体と同軸型導体の比較試験結果（解析と実測）

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tomohiro TAKAYANAGI	4. 巻 1350
2. 論文標題 Development of low inductance circuit for radially symmetric circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP SCIENCE Journal of Physics: Conference Series.	6. 最初と最後の頁 12183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1350/1/012183">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1350/1/012183</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tomohiro TAKAYANAGI	4. 巻 1067
2. 論文標題 Development of a new modular switch using a next-generation semiconductor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series (IPAC'18: IOP Light Peer Review Volume)	6. 最初と最後の頁 82019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1067/8/082019">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1067/8/082019</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 高柳 智弘	4. 巻 -
2. 論文標題 SiC-MOSFET を用いた半導体スイッチ電源の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 244,248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/index.html">https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/index.html</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tomohiro TAKAYANAGI	4. 巻 -
2. 論文標題 パワー半導体を用いたキッカー用パルス電源とイグナイトロン代替スイッチの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 75,79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/index.html">https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/index.html</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tomohiro TAKAYANAGI
2. 発表標題 Development of a new modular switch using a next-generation semiconductor
3. 学会等名 IPAC'18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro TAKAYANAGI
2. 発表標題 New design and development for an ultrahigh-voltage short pulse switch power supply
3. 学会等名 EAPPC (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高柳 智弘
2. 発表標題 SiC-MOSFET を用いた半導体スイッチ電源の開発
3. 学会等名 加速器学会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro TAKAYANAGI
2. 発表標題 Development of Low Inductance Circuit for Radially Symmetric Circuit
3. 学会等名 IPAC'19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高柳 智弘
2. 発表標題 パワー半導体を用いたキッカー用パルス電源とイグナイトロン代替スイッチの開発
3. 学会等名 加速器学会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	植野 智晶  (Ueno Tomoaki)  (80796459)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・任期付研究員   (82110)	
連携研究者	堀野 光喜  (Horino Koki)  (10796460)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・任期付研究員   (82110)	