

## 13kV-SiC-MOSFET を用いたイオン源電源の改善

### AN IMPROVEMENT OF COMPACT PULSED POWER SUPPLY FOR ION SOURCE USING 13kV-SiC-MOSFET

林秀原<sup>#A)</sup>, 木田保雄<sup>A)</sup>, 神藤勝啓<sup>B)</sup>, 徳地明<sup>A)</sup>

Soowon Lim<sup>#A)</sup>, Yasuo Bokuda<sup>A)</sup>, Katsuhiko Shinto<sup>B)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

<sup>B)</sup> OJAEA/J-PARC

#### Abstract

SiC-Power devices having a breakdown voltage of more than 13 kV are available thanks to recent scientific progress in semiconductor devices and related arts. The SiC-power semiconductors are superior to silicon in material properties, and have characteristics of high withstand voltage, high current, high thermal conductivity and low loss. There is a Si-MOSFET based pulsed power source for the ion source in the J-PARC accelerator. In this paper we show an example of miniaturization of the power source and simplification of circuit control by replacing the Si-MOSFETs with SiC-MOSFETs.

#### 1. Introduction

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は世界最高クラスの陽子 (1MW) ビームで生成する中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノなどの多彩な 2 次粒子ビーム利用するのが特徴である。総 3 構成で 1 段はリニアック、2 と 3 段はシンクロトロンである。リニアックでは、負水素イオンを発生させ、そのエネルギーを 400 MeV まで加速する。リニアックは 25 Hz の繰り返しでパルス運転され、400 MeV まで加速された後、3 GeV シンクロトロンへ負水素イオンビームを入射する[1]。

負水素イオン源は J-PARC の加速器群の先端に位置し 50 keV の負水素イオンビームを作る。ビームの作り方は、①プラズマ生成部に水素ガスを入れる。②30 MHz の連続波で低密度プラズマを生成し、ビーム引き出しのタイミングで 2 MHz のパルス波による高密度プラズマを生成する。③プラズマ生成部に高電圧を印加してプラズマからビームを引き出す。イオン源加速部はイオン源から生成されたパルス陽子ビームを Figure 1 の装置により目的のタイミングで引き出す。本論文では最先端の 13 kV 級 SiC-MOSFET を用いて既存の引き出し電源を小型化、高性能化した一例を紹介する[2]。

#### 2. Power supply using 13kV SiC-MOSFET

SiC ベースの半導体素子は、シリコンベースの半導体素子に比べて物質の特性が優れていて、約 8 倍の高電圧に耐えることができ、電流は 100 倍まで流すことができる。また、熱伝導性に優れるだけでなく、漏れ電流が小さいため、省エネに適した半導体素子である。Si-MOSFET 素子は、電圧ブロッキング性能が二倍になると、オン抵抗 (RDS(on)) が 5 倍に増加することになる。したがって、各アプリケーションで必要とされる高い耐圧特性と高周

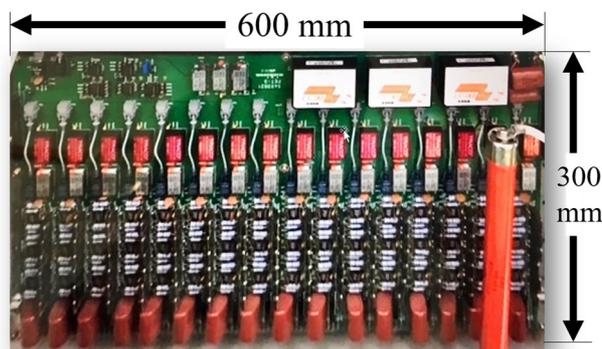


Figure 1: Pulsed power supply for the extraction of ion-beam.

波特性などを十分に満たすことができない、その代わりに、高い耐圧特性と低オン抵抗特性を達成することができる、SiC と GaN 系の wide band-gap 半導体が注目されている [3, 4]。本研究では 13kV SiC-MOSFET (DMOSFET, Tsukuba Power Electronics Consterations (TPEC))を使用した[5]。

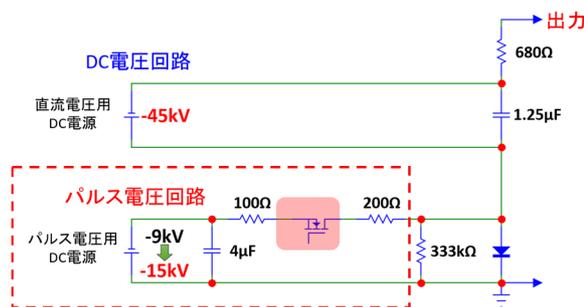


Figure 2: Circuit diagram of the pulsed power supply for ion-beam extraction.

<sup>#</sup>lim@myppj.com



Figure 3: 3 modules in series.

Figure 2 は引き出し電源の回路図を示す。イオン源加速部で-50 kV の直流電圧と-9 kV のパルス電圧を印加することで、目的のタイミングで 50 keV パルスビームが生成される。この電源は 900 V の Si-MOSFET の 16 直列、6 並列構成であり、最大 9 kV を出力できた。

本研究で改善したのはパルス電圧回路である。モジュール式構成で1モジュールには1個の SiC-MOSFET が搭載されて5kV をスイッチングする。100 mm x 180 mm サイズのコンパクトなモジュールを3つ直列構成して 15 kV を出力できる(Figure 3)。

### 3. Performance test results

#### 3.1 模擬負荷試験

模擬負荷を使用した性能試験回路と試験結果を Figure 4 に示す。メインコンデンサーを DC 電源で充電した後、3 つのスイッチモジュールを同時にトリガーして模擬負荷 (68kΩ) にエネルギー伝達した。この時の出力電圧と出力電流、スイッチモジュール電圧を測定した。試験結果、-15kV@25pps(pulse per second)で信頼性高く運転できた。スイッチング時の立ち上がり時間は 150 ns 以下であった。

#### 3.2 実負荷試験

Figure 5 に実負荷試験結果を示す。イオン源に加速、加速変調、引出電圧を印加し、正常に動作する事を確認した。試験条件は加速電圧は-25 kV、加速変調設定

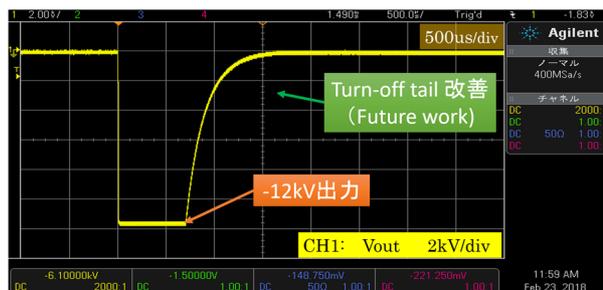


Figure 5: Result of performance tests with actual load.

電圧は-12 kV であった。フューチャーワークとして、特定数約 200 μs である Turn-off テールを短縮する予定だ。

### 4. Summary

本論文では13kV 級 SiC-MOSFET を用いて、既存の J-PARC 加速器の負水素イオン源の引き出し電源を改善した。小型のスイッチモジュールを 3 直列構成し、小型化と共に既存の 1.7 倍の出力電圧を達成した。

### 謝辞

本研究の一部は、共同研究体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)」の事業として行われた。

### 参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/ja/jparc.html>
- [2] 小栗 英知, “負イオンの加速器応用の最先端”, 日本物理学会, Japan, Sep. 19, 2012.
- [3] Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, “Report of Commercialization of power semiconductors to create new industries”, Korea, Jan. 2017.
- [4] [https://www.rohm.co.jp/documents/11401/2613879/handbook\\_power\\_device-j.pdf](https://www.rohm.co.jp/documents/11401/2613879/handbook_power_device-j.pdf)
- [5] H. Kitai *et al.*, “Low on-Resistance and Fast 13-kV SiC MOSFETs with Optimized Junction Field-Effect Transistor Region”, Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Japan, May. 28-June 1, 2017, pp. 343-346.

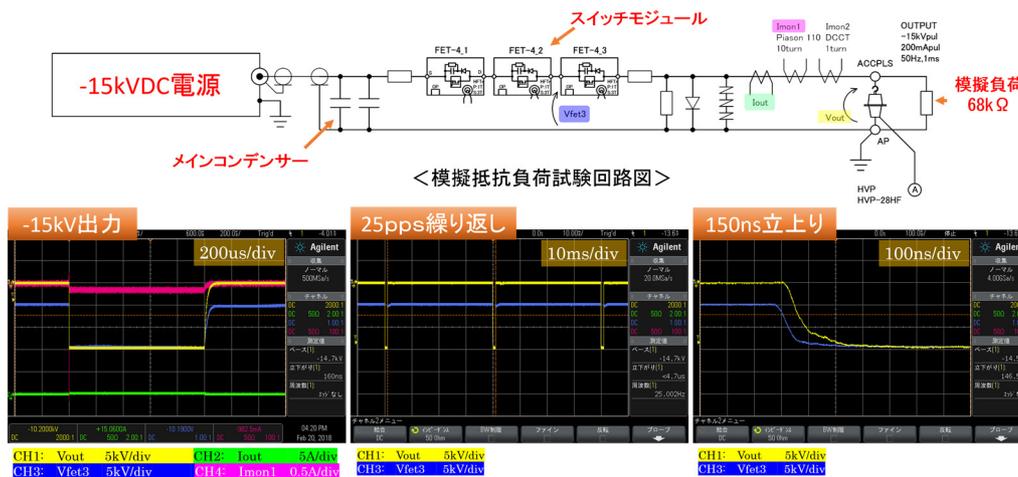


Figure 4: Circuit and results of performance tests with an artificial load.