

SiC 半導体を用いた電子銃用 50kV パルス電源の開発

DEVELOPMENT OF 50 kV PULSE GENERATOR USING HIGH VOLTAGE SiC-MOSFET FOR ELECTRON GUN

近藤力^{#,A,B)}, 安積隆夫^{A,B)}, 大竹雄次^{*,B)}, 稲垣隆宏^{B)}, 徳地明^{C)}, 森均^{C)}, 坂本邦博^{D)}

Chikara Kondo^{#,A,B)}, Takao Asaka^{A,B)}, Yuji Otake^{*,B)}, Takahiro Inagaki^{B)},

Akira Tokuchi^{C)}, Hitoshi Mori^{C)}, Kunihiko Sakamoto^{D)}

^{A)} JASRI

^{B)} RIEKN SPring-8 Center

^{C)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd.

^{D)} AIST, ADPERC

Abstract

We developed a solid-state high voltage pulse generator for a 50 kV thermionic electron gun of the next-generation SR source facility. The generator should be stable, compact, and reliable. To realize the generator, we designed Marx generator using ultra-high voltage Silicon Carbide (SiC) MOSFETs. The MOSFET has characteristics, such as a high withstanding voltage of 13 kV and a fast turn-on transient time of 100 ns. At the operation test, the generator outputs a 50 kV, 1 μ s pulse to a 25 k Ω load resistor at a 30 Hz repetition rate.

1. はじめに

次世代放射光施設における入射用線型加速器では、蓄積リングの狭いダイナミックアパーチャへ安定したビーム入射を実現するために、 $2\text{e-}9$ mrad 以下の低エミッタンスビームが要求される。その電子源である電子銃システムは、グリッド付き熱カソードを備えた 50 kV 電子銃と 238 MHz 高周波空洞空洞を一体化した構造により、安定した低エミッタンスかつ高安定な電子ビームを得られる設計としている[1]。このとき、熱電子銃のアノード・カソード間の印加電圧を短パルス化することで、電極間の放電回避、ダークカレントの抑制など多岐にわたるメリットが期待できる。そこで我々は、高電圧パルスを高安定度で出力でき、高い信頼性を持つパルス電源の開発を行った。

従来の数十 kV 以上の高電圧パルスの生成では、サイトロンなどの放電管が用いられてきたが、長期不安定性や数万時間の比較的短い寿命、また保守管理の煩雑さなどの問題があった。また、半導体スイッチによるパルス電源もこれまで開発されてきた、従来のシリコン系の MOSFET (Metal-Oxide-Surface Field Transistor) では、耐電圧が高々 1 kV 程度であり、高電圧パルスを生成するには多数の回路が必要となる。こうした点は、コンパクト化や信頼性の向上が課題であった。

近年、10 kV 以上の高い耐電圧を持つ炭化シリコン (SiC) 系の半導体が登場し、加速器電源への応用開発も行われている[2]。このような高耐圧の半導体を用いれば、回路数の大幅な削減が出来る。今回、我々は、TPEC (Tsukuba Power-Electronics Constellations) が開発した耐電圧 13 kV を持つ SiC MOSFET [3] を用いて、50 kV, 1 μ s の高電圧パルス電源を開発した。この電源は、半導体スイッチを用いた Marx 回路とし、高い安定度と長

い寿命を持たせるものとした。なお、電圧安定度は電子ビームの安定性へ要求から、0.05 %pk-pk(500 ppm)以下を目指した[4]。本報告では、開発したパルス電源の構成、ならびにパルス生成試験の測定結果を報告する。

2. 回路設計

2.1 Marx 回路

本電源で採用した Marx 回路は、多数のコンデンサをスイッチにより、充電時に並列接続、パルス出力時に直列接続に切り替えることで、高電圧パルスを発生させる回路方式である。この方式は、トランスなどの磁気回路を使用しないため、磁気回路による遅延や損失が無く、高速かつ高効率なパルス出力が可能である。

Marx 回路に関しては、様々な回路構成が提案されているが、今回は二種類の半導体スイッチを用いて、充放

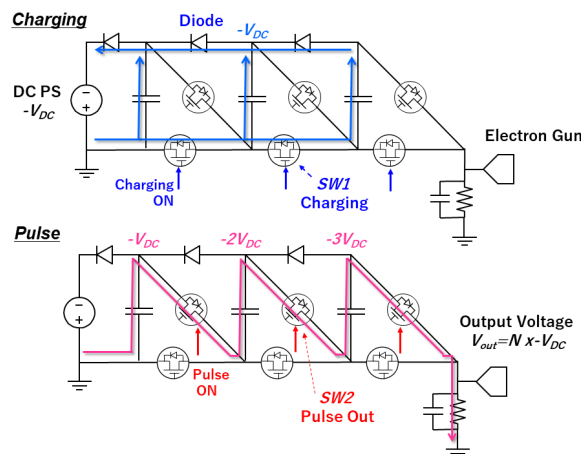


Figure 1: Circuit diagrams of solid state Marx generator and current flows in charging mode (upper), and in pulse mode (under).

#ckondo@spring8.or.jp

*Current address: JASRI

電を制御する方式[5]を用いた。Figure 1 に、回路図と充電時(上図)とパルス出力時の動作(下図)を示す。以下に、動作を簡単に説明する。

i. 充電動作:

充電スイッチ $SW1$ を ON にすることで、DC 電源からの電流が、充電スイッチやダイオードを通じて、各段のコンデンサを並列で充電する。

ii. パルス出力:

充電完了後、充電スイッチ $SW1$ を OFF し、放電スイッチ $SW2$ を ON にする。これにより、コンデンサが直列接続に切り替わり、出力端子の電圧 V_{pulse} は、充電電圧 $-V_{DC}$ と Marx 回路の段数 N の積、

$$V_{pulse} = -V_{DC} \times N$$

となる。

iii. パルス停止:

放電スイッチ $SW2$ を OFF にすることでパルス出力が停止され、電圧は自然放電の時定数で減衰する。更に充電スイッチ $SW1$ を ON にすることで出力電圧はより高速で減衰し、同時にコンデンサに再充電される。

このような充放電を2つのスイッチで制御する方式は、放電スイッチ単体の方式に比べて、高速なパルス停止が可能となり、出力パルスの幅を容易に変更できる。また、充電ラインに抵抗を用いないため、電力損失を抑える事ができる。なお、パルス出力時には、ダイオードに充電電圧と同じ逆電圧が加わるため、ダイオードにも充放電スイッチと同じ耐電圧が必要とされる。

2.2 SiC 半導体スイッチ

Marx 方式では、出力電圧は、充電電圧と Marx 回路の段数の積になるため、スイッチやダイオードなどに耐電圧の高い素子を用いることで、段数を少なくすることができる。これは、電源のコンパクトかつ高信頼化につながる。

我々は、これらの素子として、TPEC にて開発された 13 kV という非常に高い耐電圧を持つ、SiC MOSFET および SiC SBD(Schottky Barrier Diode)を用いることとした。まず素子単体でパルス試験を行い、その適正を確認した。Figure 2 に 10 kV 高電圧によるスイッチング動作試験時のセットアップと、電圧・電流波形を示す。Source-Drain 間の電圧波形より、11 kV の耐電圧と 150 ns 以下

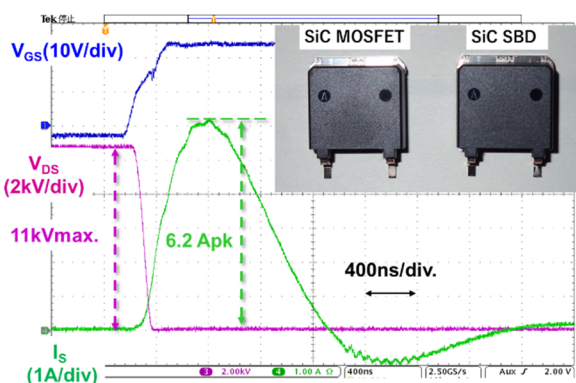


Figure 2: Waveforms and photographs of high voltage pulse test of SiC MOSFET and SiC SBD.

Table 1: Specification of Marx-type Pulse Generator for Electron Gun

Number of Marx stage	6
Charging capacitance	20 nF
Charging voltage	-10 kVdc (max.)
Output pulse	Rectangular -55kV, 2A (max.)
Pulse width (FWHM)	>1 μs
Repetition rate	30 pps (max.)
Fluctuation of peak voltage (pulse-by-pulse)	< 100 ppm (pk-pk)
Chassis size (width, depth, height)	655 mm, 445 mm, 630 mm
Weight	32 kg

の Turn-on 時間を確認し、かつ出力電流は、6 A 以上の電流出力が可能であることを確認した。なお、セットアップの詳細は、以前の報告[6]を参照されたい。

2.3. 電源システム

本パルス電源の主要な仕様を、Table 1 に示す。

電源システムは、パルス電源本体と制御ユニットの 2 つの機器で構成される。加速器に設置される時は、電源本体は加速器トンネル内の電子銃の近傍に、制御ユニットはクライストロンギャラリーの制御ラック内に設置されるため、機能や筐体の外形や機器間の配線は、これに適するように設計した。システム構成のブロック図を Fig. 3 に示す。また、電源本体の外観を Fig. 4 に示す。

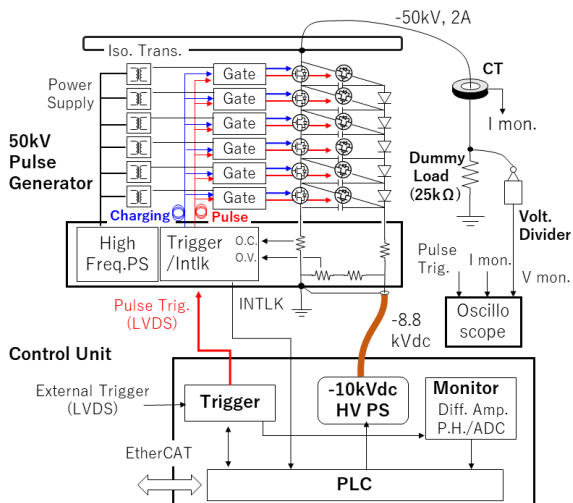


Figure 3: Schematic layout of the Marx generator and the control unit in high voltage pulse test.

パルス電源本体は、パルスが発生させる Marx 回路、SiC MOSFET を駆動するための Gate 回路、Gate 回路に給電する電源回路、そしてトリガ信号やインターロック信

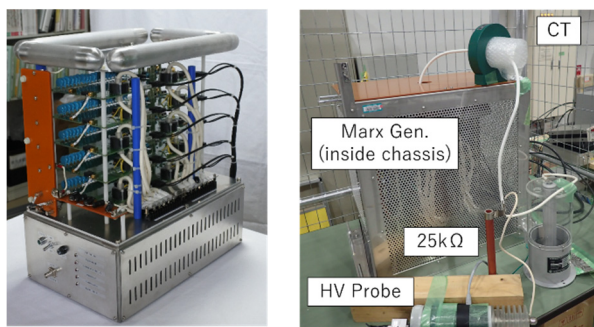


Figure 4: Photographs of the Marx generator (left) and the experimental setup (right).

号を送受信するトリガ・インターロック回路で構成される。Marx 回路は 6 段で構成されており、充電電圧-8.6 kV にて-50 kV の電圧出力が可能である。各段の Gate 回路への電力供給は、絶縁トランスを用いた高周波スイッチング方式で行っている。また、充電用 Gate 信号とパルス用 Gate 信号は、制御ユニットからのタイミング信号を受けて、電源内のトリガ・インターロック回路で生成している。各 Gate 信号線は、光ファイバーにより絶縁を確保している。この光ファイバーは Gate 回路からインターロック回路へ、故障時の異常信号の伝送も行っている。電源本体は、安全のために金属筐体で囲っており、サイズは 0.66 m(W), 0.46 m(D), 0.63 m(H)に収まっている。また、重量も 32 kg 程度で、人力での取り扱いが可能のため、加速器トンネルの狭いスペースへの設置や、保守交換も容易である。

制御ユニットは、充電用の高電圧 DC 電源、タイミング・モニタ回路、動作制御機能、および上位との通信機能を備える。高電圧 DC 電源は、-10 kV, 10 mA の高電圧電源[7]をユニット内に組み込んでいる。DC 電圧の安定度はデータシート値で 100 ppm (pk-pk)以下である。タイミング信号は、外部からのタイミング信号を受けて、電源本体へのタイミング信号と、モニタ回路のピークホールドのタイミングに用いている。なお、耐ノイズ性と高速性を考慮して LVDS(Low-Voltage Differential Signaling)信号を用いている。また、モニタ回路は、出力電圧・電流の測定器の信号を差動受けして、ピークホールドかつデジタル変換する。なお、動作制御および上位通信は、PLC により行い、通信形式は EtherCAT で行う。

3. 出力試験

3.1 試験セットアップ概要

パルス電源の出力動作を確認するため、抵抗負荷を用いた高電圧出力試験を行った。-50 kV のパルス出力時に、2 A の電流を出力できるよう、負荷抵抗は 25 kΩ とした。これは、電子ビームのピーク電流である 1 A の倍にあたる。電流モニタには Current Transformer[8]を、電圧モニタには分圧抵抗器[9]を用いていた。

3.2 DC 電圧安定度

Marx 方式の出力電圧は、充電時のコンデンサ電圧に比例するため、出力電圧の安定度は充電電圧の安定度から評価できる。Figure 5 に充電電圧-8.6 kV 時の電圧波形を 10 秒程度重ね書きした結果を示す。この線幅か

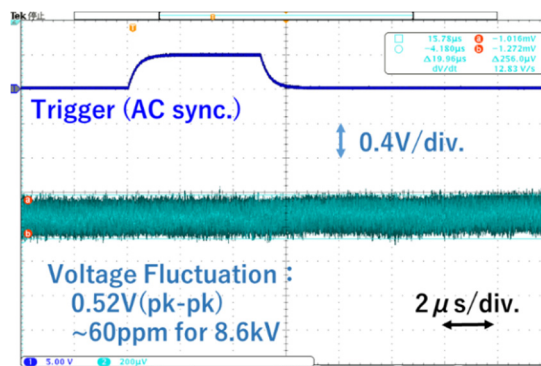


Figure 5: DC voltage waveform (light blue) at trigger timing. The voltage fluctuation is estimated from the peak-to-peak of 10 sec. persistent waveform.

ら見積もった電圧変動は、約 60 ppm (pk-pk)であり、出力電圧も同等であると推定される。これは、要求される電圧安定度を十分に満たしている。

3.3 高電圧パルス波形

Figure 6 に定格電圧 50kV 出力時の、負荷抵抗での電圧および電流波形を示す。

出力電圧波形は、負極性のほぼ矩形パルスを形成しており、立ち下がり時間は 120 ns 程度であった。また、平坦部の Droop は、2%/μs 以下であり、これは回路内の充電コンデンサから負荷抵抗への放電が主要因である。また、パルスのタイミングジッタは 1 ns(STD)以下であった。

電流波形は、立ち上がり時に、ピークで約 8 A の電流が流れるが、これは浮遊容量によるものと思われる。その後は、約 1.8 A で安定する。

また、50 kV, 30 pps の定格出力で連続運転を 20 時間以上行い、問題無く運転できることを確認した。

4. まとめと今後

我々は、次世代放射光施設の電子銃システムの高電圧電源として、13 kV SiC MOSFET を用いた Marx 方式によるパルス電源を開発した。TPEC にて開発された高

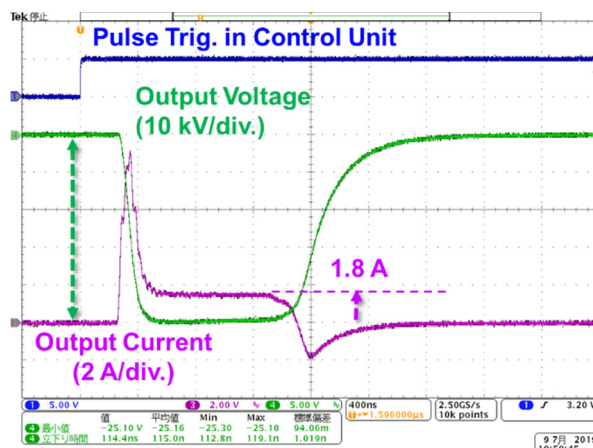


Figure 6: Waveforms of output voltage (green) and current (red) in -50 kV, 30 pps output operation with 25 kΩ resistor load.

耐圧かつ高速なスイッチング素子の事前試験、10 kV 以上の高耐圧、150 ns 以下の高速スイッチング、6 A 以上の大電流パルスの出力特性を確認した。この素子を用いた 6 段の Marx 回路により、-50 kV, 2 A, 1 μ s のパルス出力を確認した。また、出力安定度は、DC 電圧の安定度から、60 ppm(pk-pk)程度と推定される。

今後、電子銃システムに組み込み、実負荷による動作試験、長期信頼性の確認を行う予定である。

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、高電圧 SiC-MOSFET も TPEC から供給を受けております。また、本電源の開発にあたり、制御部の設計、製作、試験を行って頂いた、日立造船の川部氏、黒木氏を初めとする技術者の方々に、深く感謝します。また、実験をサポートして頂いた、スプリングエイトサービスの技術部スタッフの方々に深く感謝します。

参考文献

- [1] T. Asaka *et al.*, "Development of low-emittance gridded thermionic electron gun embedded in a single cavity with voltage-optimized electrodes", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle, July 31- August 3, 2019, Kyoto, Japan.
- [2] T. Tokuchi *et al.*, "Research on high-voltage pulsed power supplies for accelerator applications with advanced SiC devices", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan, pp. 50-54.
- [3] H. Kitai *et al.*, "Low on-resistance and fast switching of 13-kV SiC MOSFETs with optimized junction field-effect transistor region", 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), Sapporo, 2017, pp. 343-346.
- [4] T. Asaka (private communication).
- [5] A. Krasnykh *et al.*, "A solid state Marx type modulator for driving a TWT", Conference Record of the 2000 Twenty-fourth International Power Modulator Symposium, Norfolk, VA, USA, 2000, pp. 209-211.
- [6] C. Kondo *et al.*, "Switching Characteristics of High Voltage Solid-State Switch", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 625-629.
- [7] High voltage power supplies Series HCP;
https://www.fug-elektronik.de/en/files/121000/HCP_data_sheet.pdf
- [8] Wideband Current Monitors;
<https://www.pearsonelectronics.com/pdf/6656.pdf>
- [9] 高電圧用プローブ HV-P60A;
https://www.iti.iwatsu.co.jp/ja/products/accessories/03_04-1.html