

1.7 kV SiC MOSFET を用いた半導体 MARX 型マグネトロンモジュレータ A SOLID-STATE MARX-TYPE MAGNETRON MODULATOR WITH 1.7kV SiC MOSFET

生駒直弥 ^{*,A)}, 徳地明 ^{A)}

Naoya Ikoma ^{*,A)}, Akira Tokuchi ^{A)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory

Abstract

A solid-state MARX-type magnetron modulator with 1.7 kV SiC MOSFETs was developed for medical and industrial electron linear accelerators. The modulator was designed to achieve the output voltage of -40 kV by stacking the 10 MARX board with a rated voltage of -4 kV. A performance test of the fabricated modulator using a dummy resistor was carried out and it is confirmed that the output waveform meets performance objectives.

1. はじめに

電子線形加速器は、学術分野のみならず、がん治療、電子線滅菌、非破壊検査など、医療・産業分野で様々な利用が進んでいる。電子線形加速器は、主に電子銃、加速管、クライストロンあるいはマグネトロン、そして、それらの大電力高周波源を駆動するためのモジュレータ電源から構成される。中でもモジュレータは、加速器システムを安定に駆動するための心臓部ともいえる電源である。

古典的なモジュレータは、PFN (Pulse Forming Network)、サイラトロン、およびパルストランスで構成されていたが [1]、半導体デバイスの登場により、前者 2 つを IGBT によるコンデンサからの電圧切り出しで置き換えた方式も開発されてきた (Fig. 1 左)。しかし、その様な方式は、損失の大きな IGBT の冷却や、油浸パルストランスのため、小型化・軽量化に限界があり、また柔軟な波形形成も難しいというデメリットがあった。

一方で、近年、パワー半導体デバイスの開発が進み、高耐圧・低損失という優れた特徴を有するシリコンカーバイド (SiC) を用いた MOSFET の普及が進んでおり、現在では 1.7 kV 品が市販されている。

このような状況の中、小型化・軽量化が求められる医療・産業分野向けの小型電子線形加速器を主なター

ゲットとして、半導体 MARX 回路で負荷を直接駆動する方式のマグネトロンモジュレータを開発した (Fig. 1 右)。モジュレータの仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specifications of the Modulator

| | |
|-----------------|-----------|
| Voltage | -40 kV |
| Current | 80 A |
| Pulse Width | 4 μ s |
| Repetition rate | 250 Hz |

2. 半導体 MARX 回路

1924 年に Erwin Marx によって発明された MARX 回路は、複数のコンデンサを並列に充電し、スイッチによりそれらを直列に繋ぎ替えるという発想に基づく回路で、充電電圧 \times コンデンサの個数倍の高電圧パルスが得られる。ここで、スイッチングデバイスとして、ギャップスイッチのような放電スイッチではなく、MOSFET などの半導体スイッチを採用することで、高繰返し動作が可能で、長寿命、メンテナンスフリーであるだけでなく、スイッチごとにゲートタイミングを積極的に変えることで波形形成も可能という優れた機能を付与できる。このような理由から、我々は半導体 MARX 回路を採用した。

3. 基板設計

MARX 基板 1 枚当たりの定格電圧は -4 kV とした。これを実現するため、充・放電スイッチとして、定格電圧 1.7 kV の SiC MOSFET を 3 直列で使用した。したがって、この基板を 10 枚積み重ねることで、-40 kV の出力電圧が得られる設計である。SiC MOSFET の仕様を Table 2 に示す。3 直列の MOSFET の DC 的および過渡的な分圧のアンバランスを防ぐために、MOSFET と並列に分圧抵抗とスナバを設けている。また、負荷短絡や、誤動作による充・放電スイッチの同時オンによる短絡電流を抑制し、MOSFET を保護するために、充・放電スイッチにそれぞれ直列に抵抗を挿入している。MARX 基板の回路図と写真をそれぞれ Fig. 2、3 に示す。

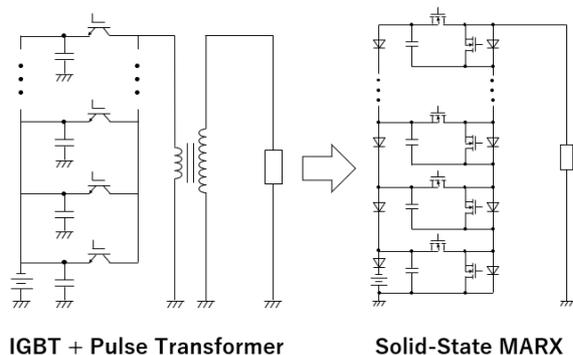


Figure 1: Schematics of an IGBT and pulse transformer-based modulator and a solid-state MARX-type modulator.

* ikoma@myppj.com

4. 構造設計

各 MARX 基板は、Fig. 4 (b) のように積み上げられる。各 MARX 基板には、地上から樹脂モールドの絶縁トランスを介して電力が供給される。また、トリガ信号も地上から各 MARX 基板に光ファイバによって送信される。モジュールタの出力電流および電圧は、筐体上部に設けられた分圧器および CT によってモニタされており、過電圧や過電流の異常が検出されると、高速でトリガを遮断し、安全に停止する。上記の部品は、450×450×1000 mm の水冷式の筐体内に収納される。重量は約 100 kg である。

5. 試験結果

本モジュールタを 500 Ω の模擬負荷抵抗に接続し、出力試験実施した。Figure 5 の通り、約 40 kV、80 A、4 μs の出力波形を確認した。繰返し 250 Hz での運転が可能であることも確認している。本電源のもう 1 つの特徴として、MARX の途中段、例えば 3 段目（出力電圧 12 kV）から電子銃用の出力を取り出せることも実証済みである [2]。これにより、本電源 1 台で電子銃とマグネトロンを駆動でき、加速器システムを簡略化することができる。

Table 2: Specifications of the SiC MOSFET

| | |
|---------------|--------|
| V_{DS} | 1.7 kV |
| R_{ON} | 35 mΩ |
| I_D | 68 A |
| $I_{D,pulse}$ | 200 A |
| T_r | 7 ns |
| T_f | 17 ns |

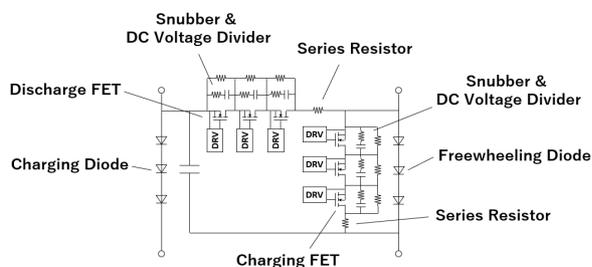


Figure 2: Schematic of a MARX board.

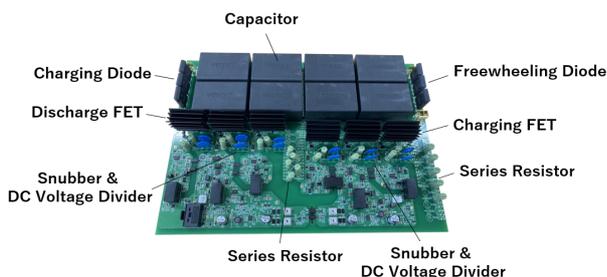


Figure 3: Picture of a MARX board.

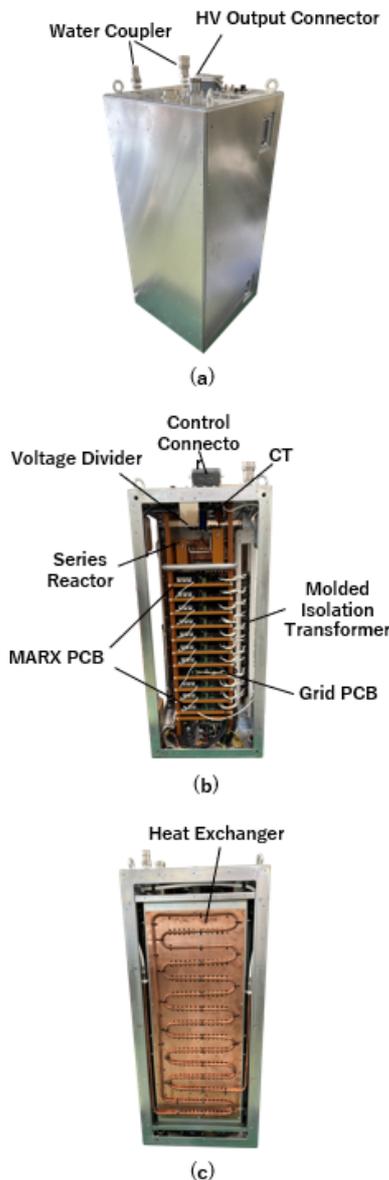


Figure 4: Picture of the modulator. (a) Exterior. (b) Front view. (c) Back view.

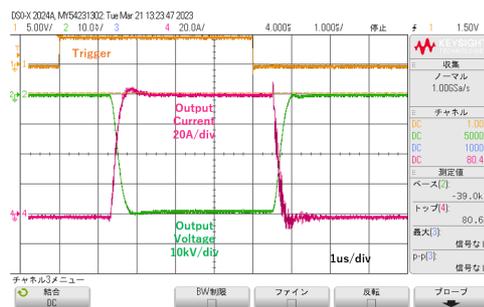


Figure 5: The output waveform of the modulator.

6. 結論

1.7 kV SiC MOSFET を採用した半導体 MARX 回路方式のマグネトロンモジュレータを開発した。定格-4 kV の MARX 基板を 10 枚積み重ねることにより、-40 kV を出力する設計とした。本電源のサイズは $450 \times 450 \times 1000$ mm であり、重量は約 100 kg である。500 Ω の模擬負荷抵抗対して出力試験を実施し、約-40 kV、80 A、4 μ s、250 Hz の性能が達成されていることを確認した。また、本電源は、MARX の途中段、例えば 3 段目（出力電圧-12 kV）から電子銃用の出力を取り出すことも可能であり、電子銃とマグネトロンの両方を 1 台の電源で駆動することにより、加速器システムの簡略化が実現できる。以上より、小型化・軽量化が求められる医療・産業分野向けの小型電子線形加速器に適したモジュレータを開発できたものとする。今後は、さらなる小型化を目指した開発を進める。

参考文献

- [1] C.J. Karzmark, C.S. Nunan and E. Tanabe, "Medical Electron Accelerators", McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [2] N. Ikoma, A. Tokuchi, "A combined all-solid-state MARX power supply for a magnetron and an electron gun", IEEE Pulsed Power Conference 2023 (PPC2023), Texas, USA, Jun. 2023.