

パルスパワー電源への応用に向けた SiC MOSFET の特性評価 THE CHARACTERIZATION OF SiC MOSFET FOR APPLICATION TO PULSED POWER SUPPLIES

生駒直弥*, 中田恭輔, 虫邊陽一, 徳地明

Naoya Ikoma*, Kyosuke Nakata, Yoichi Mushibe, Akira Tokuchi

Pulsed Power Japan Laboratory

Abstract

In conventional pulsed power supplies for particle accelerators, discharge tubes have been used as high-voltage, high-current switching devices. Recently, a semiconductor switch, especially for a SiC MOSFET, is expected as an alternative switching device, due to its attractive characteristics, such as the higher breakdown field strength and the low power loss. A semiconductor pulse power supply consists of many semiconductor switches connected in series and parallel. To reduce the cost and the size of a power supply, it is required that reduce the number of semiconductor switches. Therefore, an evaluation of a turn-on time and an on-resistance, which determine the power loss at the semiconductor device, is required to investigate the feasibility of the low-cost and small power supply. In this report, we characterized five SiC MOSFETs.

1. はじめに

粒子加速器では、キッカー電磁石電源、クライストロンモジュレータ等、様々な機器でパルスパワー電源が使用されている。そのような電源では高電圧、大電流、高速ターンオンという厳しい条件が要求されるため、保守性や寿命の観点から多くの欠点があるものの、スイッチングデバイスとしては従来よりサイラトン等の放電管が用いられてきた。一方で、近年では半導体デバイスの開発が進み、特に高耐圧、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 についても、パワーエレクトロニクス分野を中心に普及が進み、様々な製品が入手可能となっている。このような状況のもと、当社では SiC MOSFET を用いた加速器用半導体パルスパワー電源の開発に取り組んでいる [1]。ここで、放電管の定格電圧、電流はそれぞれ数 10kV、数 kA であるのに対し、SiC MOSFET の定格電圧は最大でも 1.7kV、電流も 100A 程度である。このため、半導体パルスパワー電源では、半導体スイッチを複数直列、並列に接続し、高電圧、大電流に対応したスイッチを構成する手法がとられる。したがって、電源の小型化、低コスト化の観点からは、並列数を如何に削減するかが 1 つのポイントとなり、並列数を削減するには、実際の使用条件を想定したパルス大電流に対する、SiC MOSFET の特性を評価する必要がある。中でも、電源の出力波形の立上りや、電源での損失 (発熱) を決める要因となるターンオン時間とオン抵抗の評価が、特に重要となる。そこで、この度 5 種類の SiC MOSFET に対し、ターンオン時間、及びオン抵抗の、ドレイン電流依存性を評価したので報告する。

2. 評価した SiC MOSFET

本研究では、表 1 に示す 5 種類の SiC MOSFET の特性を評価した。ここで、製品 D は定格電圧 1,700V、

それ以外は 1,200V の製品である。また、製品 E はケルビン端子 (またはゲートソース端子) 付きの 4 pin モデル、それ以外は通常の 3 pin モデルである。ケルビン端子付きモデルでは、主回路の (すなわち大電流が流れる) ソース端子と、ゲート回路のソース端子が分かれており、主回路のインダクタンスによるゲート電圧の変動を受けにくく、速い立上り速度が得られるようになっている。

3. 実験方法

実験は、図 1 に示す回路を用いて行った。まず、充電抵抗、及びインダクタを通して、コンデンサを 800V (耐圧 1,700V の製品 D に対しては 1,160V) で充電する。次に、パルス幅 $1.5\mu\text{s}$ のトリガを入力し、負荷抵抗に放電させる。なお、ゲート波形は、図 2 に示す $+20/-3\text{V}$ の矩形波である。この時のドレインソース電圧 V_{DS} 、ドレイン電流 I_D の波形を、それぞれ高電圧差動プローブ (横河計測, 701926)、およびロゴスキーコイル (岩崎通信機, SS-284A) で測定する。同様の実験を、負荷抵抗を 10Ω ~ 短絡まで変化させて行い、ドレイン電流に対するターンオン時間とオン抵抗を評価した。

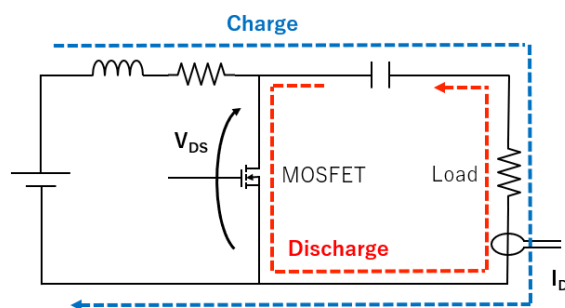


Figure 1: The electrical circuit for the characterization of SiC MOSFETs.

* ikoma@myppj.com

Table 1: The List of SiC MOSFETs Tested in this Study

Product	A	B	C	D	E
V_{DS} [V]	1,200	1,200	1,200	1,700	1,200
R_{ON} [m Ω]	80	40	30	45	12
V_{GS} [V]	+22 / -6	+22 / -4	+22 / -4	+20 / -5	+20 / -10
$V_{GS,pulse}$ [V]	+26 / -10	+26 / -4	+26 / -4	+25 / -10	-
I_D [A]	40	55	72	72	100
$I_{D,pulse}$ [A]	80	137	180	160	200
P_D [W]	262	262	339	520	-
Rise time [ns]	33	39	42	20	22
Fall time [ns]	28	24	29	18	35

4. 実験結果

実験結果のうち、代表として製品Cの V_{DS} , I_D の波形を、図3に示す。負荷抵抗を小さくして I_D が増えるとともに、 V_{DS} の立下り、 I_D の立上りは共に遅くなっていることが分かる。また、 I_D が大きくなると、オン抵抗が増加し、ターンオンしても V_{DS} は0Vまで下がらなくなる。

5. ターンオン時間、オン抵抗の評価

図3に示した波形から、以下のような定義のもと、ターンオン時間とオン抵抗を求めた。まず、ターンオン時間は、 V_{DS} が90%-10%まで下がる時間とした。但し、負荷短絡時のように V_{DS} が10%まで下がらない場合は、ターンオン時間を定義できない。そして、オン抵抗は、 V_{DS}/I_D よりオン抵抗を求め、そのうち1.3 μ s時点での値を代表値とした。

各SiC MOSFETについて、 I_D のピーク値に対するターンオン時間とオン抵抗の変化を図4に示す。製品A~Dは、いずれもドレイン電流の増加とともに、ターンオン時間、オン抵抗が増加していることが分かる。これは、この領域ではMOSFETでの損失が増加することを意味している。製品Dに関しては、~250Aまでであれば、ターンオンが100ns未滿かつ、オン抵抗の増加がほとんどない領域で使用できる。製品Eでは、ターンオン時間、オン抵抗の顕著な増加は見られなかった。以上より、パルス大電流用途では、製品D, Eが適していることが分かった。

6. 結論

本稿では、加速器におけるパルスパワー電源の半導体化を目指し、5種類のSiC MOSFETに対して、パルス大電流に対するターンオン時間、オン抵抗の特性を調べた。その結果、製品Dは~250A程度まで、製品Eはより大きな電流まで、ターンオンが100ns未滿かつ、オン抵抗の増加がない領域で使用できることが分かった。すなわち、小型、低コストな半導体パルスパワー電源に適した素子であることが分かった。今後の予定としては、上記SiC MOSFETの採用により、並列数を減らした半導体パルスパワー電源

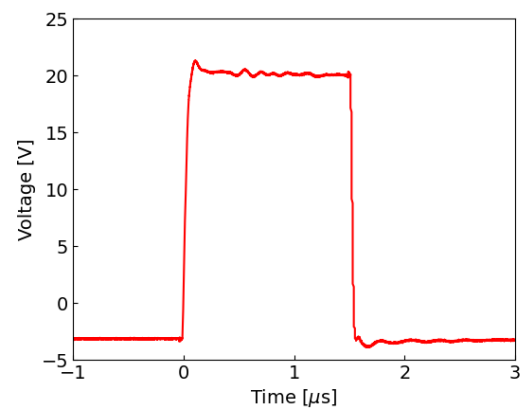


Figure 2: The gate voltage waveform.

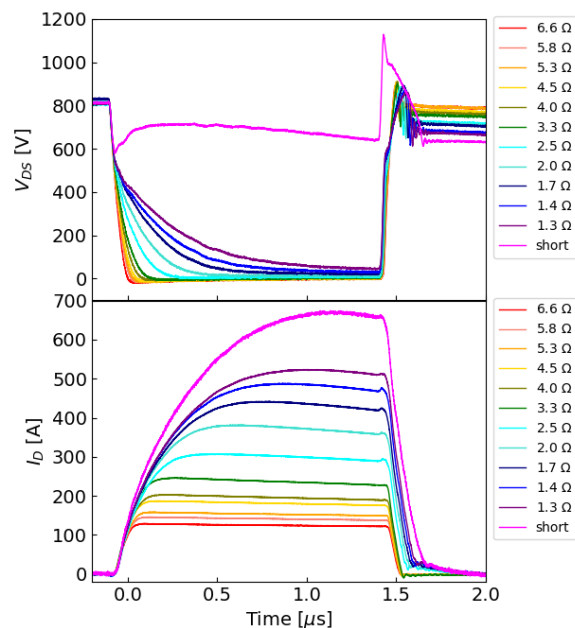


Figure 3: The V_{DS} and I_D waveforms of product C.

を実際に製作し、(並列数の多い)従来型との性能比較や、コストダウンの実現可能性について調査する。

参考文献

- [1] A. Tokuchi *et al.*, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, TUOM02.

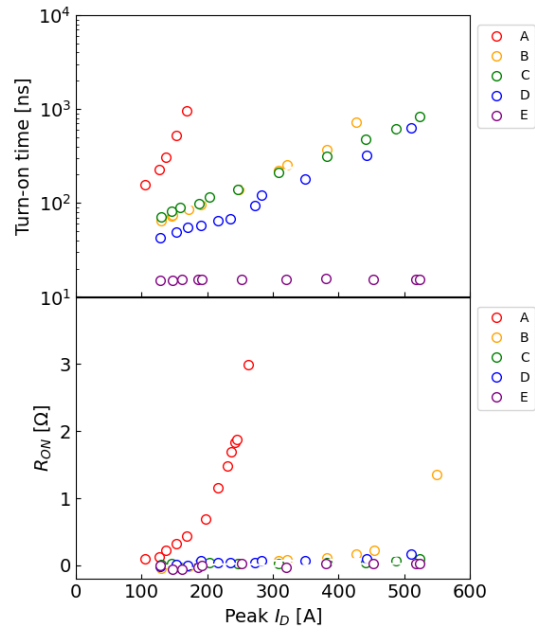


Figure 4: The dependence of turn-on time and on-resistance on I_D .