

加速器電源への応用のためのスイッチング素子「Solidtron」の評価試験 EVALUATION TEST OF “Solidtron” SOLID-STATE SWITCHING DEVICE FOR ACCELERATOR APPLICATIONS

言美龍二郎[#], 生駒直弥, 徳地明
Ryujiro Gombi[#], Naoya Ikoma, Akira Tokuchi
Pulsed Power Japan Laboratory

Abstract

Accelerators use a large number of high-voltage pulsed power supplies. One of the key elements of a high-voltage pulsed power supply is the switching element. Thyratrons have been conventionally used as switching devices for high-voltage pulsed power supplies, but in recent years, power semiconductor devices such as SiC MOSFETs have been developed from the viewpoint of controllability and lifetime. This report evaluates the “Solidtron” manufactured by Excelitas Technologies, which is a type of thyristor that has recently developed.

1. 背景・目的

加速器では、多数の高電圧パルス電源が用いられる。高電圧パルス電源におけるスイッチング素子には、高電圧、大電流、高速といった性能が求められ、それらを満たすスイッチング素子としてサイラトロンやイグナイトロンといった真空管素子が挙げられる。これらは古くから使われているが、サイラトロンは日常的な調整が必要であることや、寿命が短く高価であるという課題を抱えている[1, 2]。イグナイトロンは人体に有毒である水銀を用いていることから法規制、環境負荷の面で課題がある。このような背景から、加速器用高電圧パルス電源では真空管素子からパワー半導体スイッチへの置き換えが急務となっている。

しかし高電圧、大電流、高速といった要件を満たすパワー半導体スイッチについても、かつて商品化されていた静電誘導サイリスタ(Static Induction Thyristor: SI-サイリスタ)が製造中止となったという過去がある[3]。そのような中で、近年新たに Excelitas Technologies 社で「Solidtron™ SP245-05」が開発・商品化された。Solidtronの外観を Fig. 1 に示す。Solidtron はサイリスタ構造を持つ比較的小型な素子で、直並列に多重化することにより高電圧パルス電源への搭載が可能であると考えられる性能が仕様を示されている (Table 1)。本研究では新た

Table 1: Specifications of Solidtron

Model Number	SP245-05
Repetitive Off-State Voltage [V]	1500
Peak Non-Repetitive Surge Current [A]	4000
Peak Repetitive Surge Current [A]	3500
Rate of Change of Current [kA/μs]	100
Critical Capacitor Discharge Event Integral [A ² s]	TBD
Repetitive Capacitor Discharge Event Integral [A ² s]	2

なスイッチング素子の高電圧パルス電源への応用を期待し、設計時に重要となる基礎データとして電流の耐量とI²tの耐量を確認する試験を行った。

2. 製作した試験用回路

本試験では正弦半波状のパルス波形を得るため、LCR 直列回路を製作した。一般的な LCR 直列回路を Fig. 2 に示す。C に電圧 V[V]を充電し、回路に流れる電流を*i*(*t*)として t=0 でスイッチを閉じる場合を考える。スイ

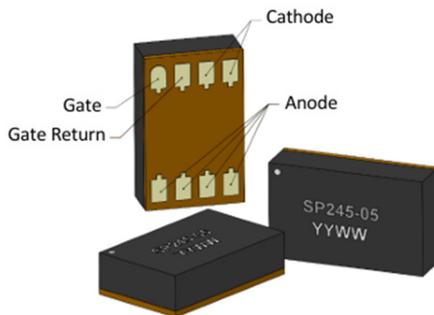


Figure 1: Appearance of Solidtron.

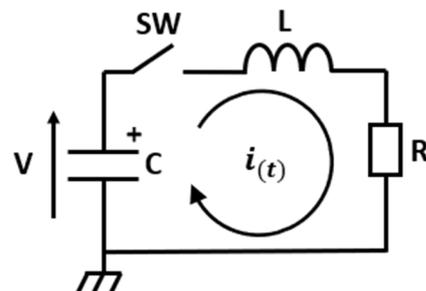


Figure 2: General LCR series circuit.

[#] gombi@myppj.com

スイッチが理想的であるとした場合、回路に流れる電流 $i(t)$ はR、L、Cの値によって以下の3つに場合分けされる。ただし $\alpha = \frac{R}{2L}$ 、 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ である。

$\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$ のとき、

$$i(t) = \frac{V}{L\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin\left(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}t\right) \quad (1)$$

$\alpha^2 - \omega_0^2 = 0$ のとき、

$$i(t) = \frac{V}{L} t e^{-\alpha t} \quad (2)$$

$\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$ のとき、

$$i(t) = \frac{V}{L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh\left(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}t\right) \quad (3)$$

Equation (1)は減衰振動、Eq. (2)は臨界制動、Eq. (3)は過制動と呼ばれる。例として、Fig. 3にそれぞれの波形を示す。

次に、実際に製作した主回路の回路図を Fig. 4 に示す。Figure 2におけるスイッチをSolidtronに置き換え、ダイオードを逆並列に接続している。これは Eq. (1)の減衰振動の際に逆電流がSolidtronに流れてしまうことを防ぐためである。

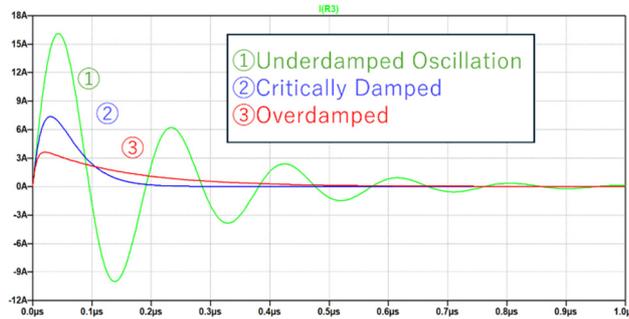


Figure 3: Transient solution of LCR series circuit.

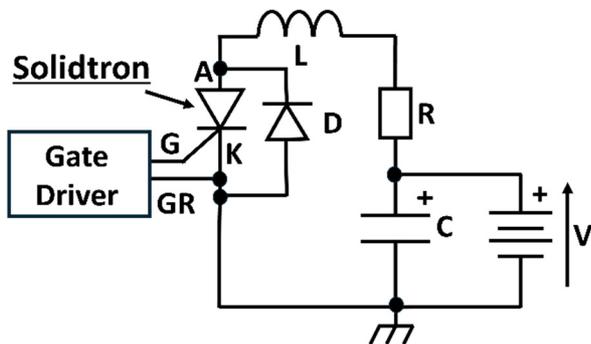


Figure 4: Main circuit.

3. 試験方法

本試験では2つのアプローチから高電圧パルス電源用スイッチング素子としての性能を評価した。高電圧パルス電源に使われる半導体スイッチは通常、単体のみでは耐電圧、耐電流が不十分である。そのため、1種類の半導体スイッチを直列に繋げることで耐電圧を、並列に繋げることで耐電流を確保し、即ち多重化してそれらを同時にスイッチングすることで高電圧、大電流、高速なパルスのスイッチングを実現している。この場合、理論上では多重化されている1つ1つの素子にかかる電圧や流れる電流は同じであるが、実際上では生産時の個体差や温度差等によるパラメータのバラつきが存在し、偏りが生まれる。高電圧パルス電源の製造ではこの偏りを考慮した上で十分な安全マージンを確保した設計が必要である。

試験 A では減衰振動波形で電流耐量を確認する試験を行った。減衰振動の式である Eq. (1)における電流のピーク値 i_{peak} は以下の通りになる。

$$i_{peak} = \frac{V}{\omega_0 L} e^{-\alpha t_{peak}} \quad (4)$$

上式より、より大きな i_{peak} を得るためにはLを可能な限り小さくする必要があり、回路中の寄生インダクタンスを減少させるため回路ループ面積をより小さくできるような回路設計を行った。コンデンサの充電電圧 V_C を350~650 Vまで50 Vの間隔で上げていき、放電する試験を行った。

試験 B では I^2t の耐量を確認する試験を行った。臨界制動波形でピーク値を定格値に固定し、パルス幅(Full Width Half Maximum: FWHM、半値全幅)を伸ばして I^2t を増加させていく。 I^2t は素子に電流が流れた際に、電流波形の形状に関係無くどれだけのジュール熱に耐えられるかの指標となる値であるが、Table 1にある通り、繰り返し時の定格 I^2t は定まっているが単発時についてはTBD (To Be Determined: 未定)となっている。本試験では、減衰振動のような振動波形ではパルスが複数回印加されるため、また過制動では長時間の低ストレスを素子に与えることになるため、単発かつ短時間で収束する臨界制動波形による試験を行った。臨界制動波形を維持しながらパルス幅を伸ばすため、L、Cの値をそれぞれ

120 nH~240 nH、60 μ F~120 μ Fの間で変化させる。また、それぞれのパルス幅に対し100ショットずつ打つことで、繰り返し放電した場合の影響についても確認する。各試験で設計した回路素子の諸量を Table 2 に示す。

Table 2: Test Conditions

	Test A	Test B
R	0.03 Ω	0.09 Ω
L	20 nH	120 nH~240 nH
C	4 μ F	60 μ F~120 μ F

4. 試験結果

試験 A の結果を Fig. 5 に示す。図中では $I_{AK}=300$ A となった時点を $t=0$ としている。図の波形では単発時の定格電流値 4 kA の約 1.85 倍となる 7.4 kA のピーク値が確認できる。

次に、試験 B の結果を Fig. 6 に示す。いずれの波形もそれぞれの条件での 100 ショット目の I_{AK} を示しており、 $I_{AK}=1$ kA となった時点を $t=0$ としている。L=240 nH, C=120 μ F のとき、パルス幅が最も長い 14 μ s を記録している。Figure 7 に、この波形の 1 ショット目と 100 ショット目の電流波形を重ねた図を示す。本試験では L=120 nH, C=60 μ F の試験から同一の個体を連続で使用しているが、Fig. 7 よりパルス幅 14 μ s の電流を 100 回放電しても劣化していないことが確認できる。また、この波形に対して $\int I_{AK}^2 dt$ を区分求積的に求めると、

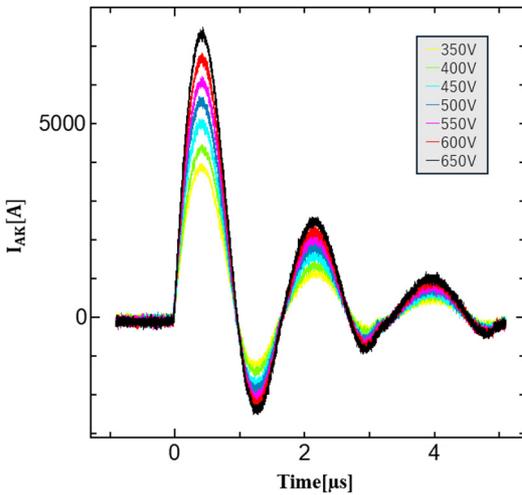


Figure 5: Results of Test A.

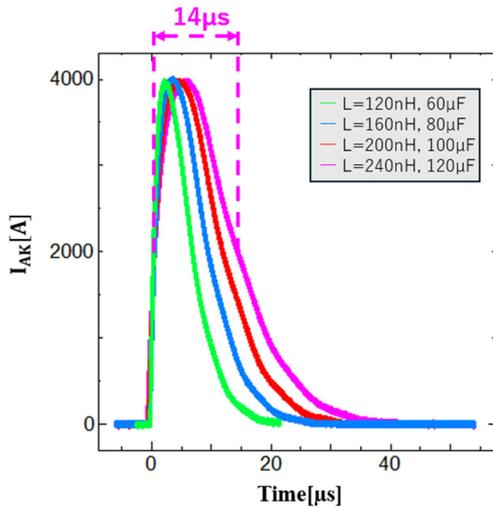


Figure 6: Results of Test B.

$$\int I_{AK}^2 dt \approx \sum_n (I_{AK_n}^2 * \Delta t) \approx 166 \text{ A}^2\text{s} \quad (5)$$

となった。

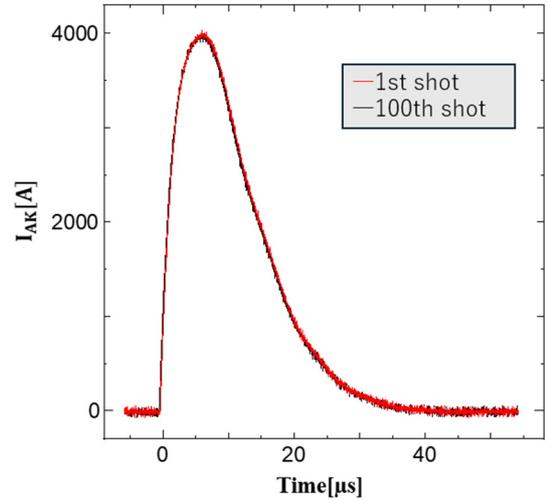


Figure 7: Comparison of 1st shot and 100th shot (L=240 nH, C=120 μ F).

5. 結論・展望

新しく開発・商品化された Solidtron SP245-05 を、LCR 直列回路を自作して評価した。試験 A では電流が定格値の約 1.85 倍もの電流が流せることが確認できた。試験 B ではピーク電流 4 kA、パルス幅 14 μ s で 100 ショット打てることが確認でき、その I^2t は 166 A^2s という結果が得られ、目的としていた電流と I^2t の耐量を確認することができた。

今後の展望として、 I^2t を一定として電流値を下げ、パルス幅を伸ばしていく試験によって、更なる安全動作領域の確認を行う予定である。また、実際に加速器で使用される高電圧パルス電源は 10 Hz 程度の繰り返しでの運用が要求されているため、繰り返し試験を行うことも今後の課題であると考えられる。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Solid-State switch development for thyratron replacement”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Oct. 2022.
- [2] T. Takayanagi *et al.*, “Development of a new power supply for the RCS kicker Magnet with the LTD circuit of SiC-MOSFET”, Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2017.
- [3] A. Tokuchi *et al.*, “A development of a high voltage, large current static induction thyristor”, Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2019.