

小特集 半導体パルスパワー電源の現状と今後 ～プラズマ研究をささえる半導体パワーデバイス～

3. SOS ダイオードによる誘導性エネルギー蓄積型パルス電源

浪平隆男, 佐久川貴志, 勝木 淳, 秋山秀典
(熊本大学)

Pulsed Power Generator with Inductive-Energy Storage Using Semiconductor Opening Switch

NAMIHIRA Takao, SAKUGAWA Takashi, KATSUKI Sunao and AKIYAMA Hidenori

Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan

(Received 25 January 2005)

Pulsed power technology enables the generation of large electrical power of micro to nano second duration by compressing and releasing electrical energy. The pulsed power is utilized in a variety of applications such as large-volume non-thermal plasmas and excimer laser excitation, neither of which could be realized by conventional high-voltage and current technology. Pulsed power has been generated by capacitive energy storage (CES) systems based on the direct discharge of the capacitor. On the other hand, inductive energy storage (IES) systems, in which an inductor stores the energy, allow for more compact system configuration. In the IES system, an opening switch is always necessary to release the stored energy and is required to interrupt a large current quickly. In this paper, a new type of pulsed power generator based on the IES system using a semiconductor opening switch (SOS) is introduced. The SOS allows for all-solid-state, stable and long-lifetime operation, as well as a high repetition rate for pulsed power generators.

Keywords:

semiconductor opening switch (SOS), pulsed power generator, inductive energy storage

3.1 まえがき

パルスパワーの発生方法には、エネルギーを電界の形でコンデンサに蓄える容量性エネルギー蓄積 (Capacitive Energy Storage, CES) と磁界の形でインダクタに蓄える誘導性エネルギー蓄積 (Inductive Energy Storage, IES) の2種類があげられる。Table 1 には両者の比較を示すが、IESのエネルギー蓄積密度はCESより2桁以上大きいことが知られている。そのためIESは小型・軽量のパルスパワー発生装置開発への魅力を秘めている。しかし、IESを用いたパルスパワーの発生には、大電流を高速に遮断するオープニングスイッチが必要不可欠である。

オープニングスイッチには、電流源から供給される大電

流の周期に見合う導通時間を持ち、瞬時に導通電流を遮断することが必要で、遮断時に発生する高電圧によって絶縁破壊することなく、動作後はすばやく初期の状態に戻れるといった性能が要求される。これまでのオープニングスイッチ開発は、ヒューズやプラズマオープニングスイッチなどを代表とし、いかに大電流を高速に遮断するかが開発の中心であった。これらのオープニングスイッチは基本的に単発動作に適しており、近年のパルスパワーの産業応用を後押しする高繰り返し動作への対応は難しかった。本章では、近年開発が進み高繰り返しで安定した動作が可能なオープニングスイッチとして認知されつつある「半導体オープニングスイッチ (Semiconductor Opening Switch, SOS)」について、そのスイッチ原理とSOSを用いたパルスパワー電源について述べる。

Table 1 Comparison of CES and IES for pulsed power production (C: Capacitance, V: Charging voltage, L: Inductance, I: Circuit current).

	Capacitive Energy storage	Inductive Energy storage
Medium for energy storage	Capacitor	Inductor
Storage energy	$(CV^2)/2$	$(LI^2)/2$
Energy density	$\sim 10^5 \text{ J/m}^3$	$\sim 10^7 \text{ J/m}^3$
Energy density against mass	$\sim 10^2 \text{ J/kg}$	$\sim 10^4 \text{ J/kg}$
Switch	Closing	Opening

3.2 半導体オープニングスイッチ

半導体オープニングスイッチ (Semiconductor Opening Switch, SOS) は、Institute of Electrophysics, Russian Academy of Scienceにて研究が始まった比較的新しいオープニングスイッチであり、ダイオードの逆電流遮断特性を利用することでオープニングスイッチとして動作させる[1-4]。ダイオードとはp型半導体とn型半導体を接合したものであり、通常順バイアスをかけたときのみ順方向電流

Corresponding author's e-mail: namihira@eeecs.kumamoto-u.ac.jp

が導通する。しかし、順バイアスから逆バイアスへと瞬時に極性を入れ替えた場合、蓄積されている少数キャリアが再結合するまでの短い時間は逆方向電流が導通可能である。この逆方向電流は少数キャリアの消滅とともに遮断されるため、この現象を利用してオープニングスイッチとして動作させる。Fig. 1には最も基本的な SOS を用いた IES 方式パルス発生回路及び各部における電圧・電流の P-SPICE 解析による結果を示す。まず、 $t=0$ にてスイッチ S を閉じると、 $C \cdot L \cdot \text{SOS}$ の閉回路へ電流 I_{SOS} が流れる。このとき SOS 中に少数キャリアが形成・蓄積される。 I_{SOS} の半周期 (C の電圧反転) 後、反転電流 $-I_{\text{SOS}}$ が回路中へ流れ始めるが、SOS 中へ蓄積された少数キャリアの影響により、反転直後は SOS へ逆方向電流が流れる。この逆方向電流は上述したように少数キャリアの消滅とともに遮断される。そのため、遮断後は負荷へ急速に $V_R = L(dI_{\text{SOS}}/dt)$ の電圧が印加されることとなる。

Fig. 2 および Table 2 には Institute of Electrophysics, Russian Academy of Science にて開発されている SOS ダイオードの外観ならびに諸特性を示す [5]。SOS ダイオードは $p^+ \cdot p \cdot n \cdot n^+$ の内部構造を有する複数の半導体ダイオードがスタックされており、各素子間には温度上昇を抑制するためのヒートシンクが取り付けられている。また、半導体ダイオードを利用しているため安定した動作が可能であり、寿命も半永久的である。なお、SOS ダイオードは kA 程度の大電流を高速で遮断可能 (数 - 数十 ns) であり、短い自己回復時間 ($< 1 \mu\text{s}$) を有するため、立ち上がり時間が短いパルス電圧を発生させるとともに kHz に及ぶ高繰り返し動作が可能である。近年では、これらの特性を生かし有害ガス処理や表面処理、殺菌を目的とした非熱平衡 (低温) プラズマ [6]・大気圧グロー放電 [7] の生成やエキシマレーザの励起源 [8] といった産業応用向けのパルス電源へ SOS ダイオードが組み込まれるようになってきている。Fig. 3

には SOS を用いた IES 方式パルス電源を用いることで XeF レーザの出力光がロングパルス化した結果を示す [8]。これは SOS ダイオードによりレーザ電極への印加電圧立ち上がりが高速化し、放電安定性が改善されたことに起因する。

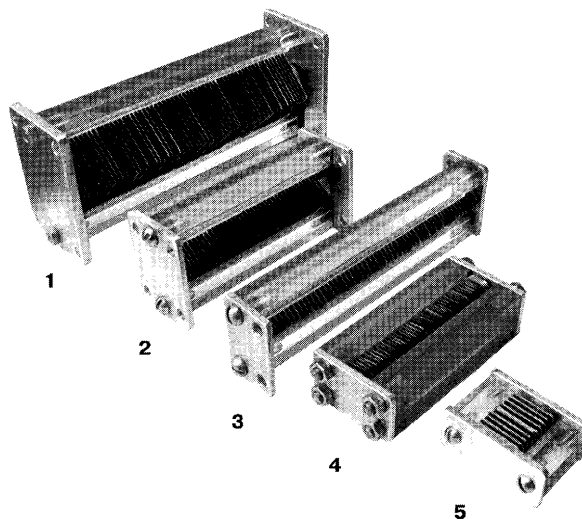


Fig. 2 External appearance of SOS-diodes [5].

Table 2 Technical characteristics of SOS-diodes [5].

Parameter	Value
Working voltage	60 - 250 kV
Number of series connected structures	80 - 320
Structure square	0.25 - 4 cm ²
Forward current density	0.4 - 2 kA/cm ²
Cutoff current density	2 - 10 kA/cm ²
Forward pumping time	300 - 600 ns
Reverse pumping time	40 - 150 ns
Cutoff time	1 - 10 ns
Length	80 - 220 mm
Mass	0.1 - 0.6 kg

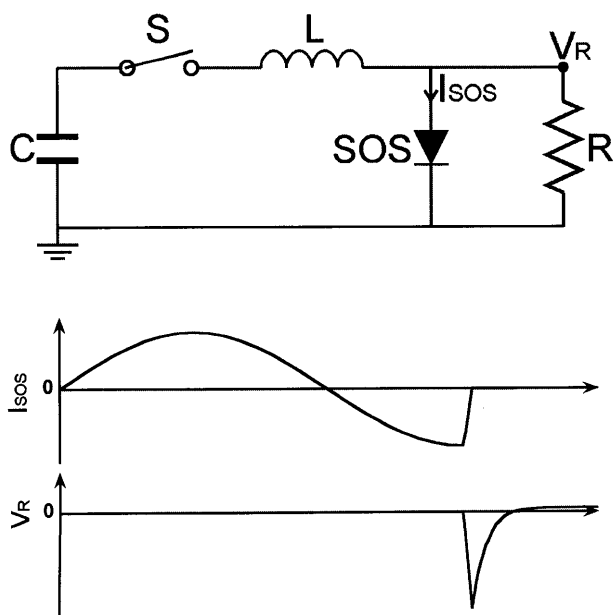


Fig. 1 Basic circuit of IES type pulse generator using SOS.

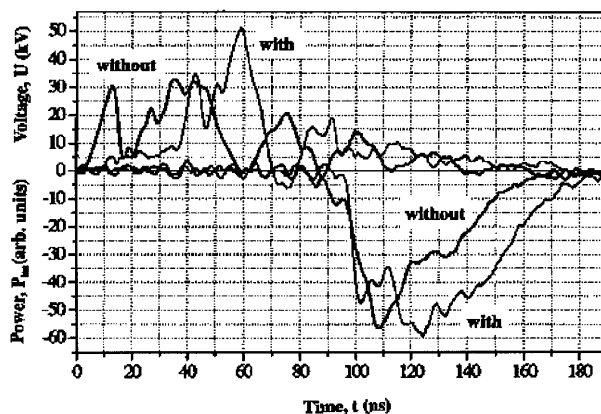


Fig. 3 Advantage of SOS-based pulse generator [8] (Voltage and laser power in case of with and w/o SOS).

3.3 SOSを用いたIES方式パルスパワー発生装置

Fig. 4にSOSを用いたIES方式パルスパワー発生装置(SOSパルス電源)の主なエネルギー転送過程を示す。Fig. 4に示されるようにSOSパルス電源においては、まず比較的低電圧の直流電源(〜5 kV)にてコンデンサへ充電されたエネルギーが、サイリスタやIGBT等で代表される半導体クローリングスイッチを介し磁気圧縮部へ転送される。次に磁気圧縮されたエネルギーは、SOSへ転送され更なる圧縮後負荷へ転送されることとなる。

Fig. 5は熊本大学にて開発されたSOSパルス電源の回路図[9]、Table 3は組み込まれているSOSダイオード(SOS-100-1, Russia)の諸特性である。本電源は、一次コンデンサの充電に商用電源(200 V, 60 Hz)を利用することでトリガレスにて作動するようになっており、商用周波数と等しいパルス繰り返し周波数にて電圧200 kV、パルス幅50 ns程度のパルス電圧が発生するユニークな構成となっている。Fig. 6は上述電源に(a)300 Ωおよび(b)1 kΩの抵

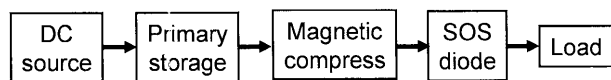


Fig. 4 Energy compression process of SOS-based pulse generator.

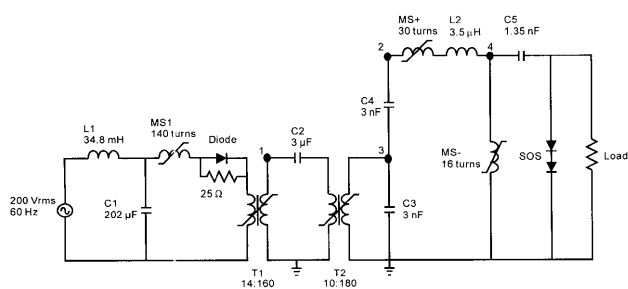


Fig. 5 Trigger-less pulsed power generator using SOS [9].

Table 3 Specification of SOS-100-1 [9].

Parameter	Value
Maximum peak reverse voltage	100 kV
Pulse duration (FWHM)	10 – 60 ns
Forward pumping current	100 – 300 A
Reverse pumping current	500 – 1500 A
Forward pumping time	300 – 500 ns
Reverse pumping time	40 – 100 ns
Current interruption time	5 – 15 ns
Switching energy losses	0.2 – 0.5 J/pulse
Recommended switching energy at 100 – 1000 Hz PRF	1 – 5 J/pulse
Recommended overvoltage coefficient (SOS output voltage to pumping capacitor voltage ratio)	1.5 – 2.5
Recovery time	≤ 1 μs
Maximum dissipation power in oil	200 W
Continuously	2 kW
Burst mode (30 sec)	
Dimensions	116 × 63 × 44 mm ³
Mass	350 g

抗負荷を接続した場合のSOSに流れる電流(I_{SOS})と負荷への印加電圧(V_R)を示す。両抵抗値において、オープニング前のSOSに流れる順方向及び逆方向電流は同様であるが、電流遮断に要する時間および V_R のパルス幅は1 kΩ負荷においてより短くなっている。これはオープニング中およびオープニング後の回路時定数が、負荷抵抗の大きさに反比例して減少するためである。なお、本電源では、300 Ω抵抗負荷に対して最大値-150 kV、立ち上がり14.5 ns、パルス幅60 ns、1 kΩ抵抗負荷に対して-220 kV、12.7 ns、35 nsを有するパルス電圧が得られている。Fig. 7には上述電源の出力電圧パルスの安定性試験結果を示す。15分間60 ppsの繰り返し周波数にて連続運転を行っているが、出力電圧は161.5 ± 2.4 kVとその安定度は3%以内である。

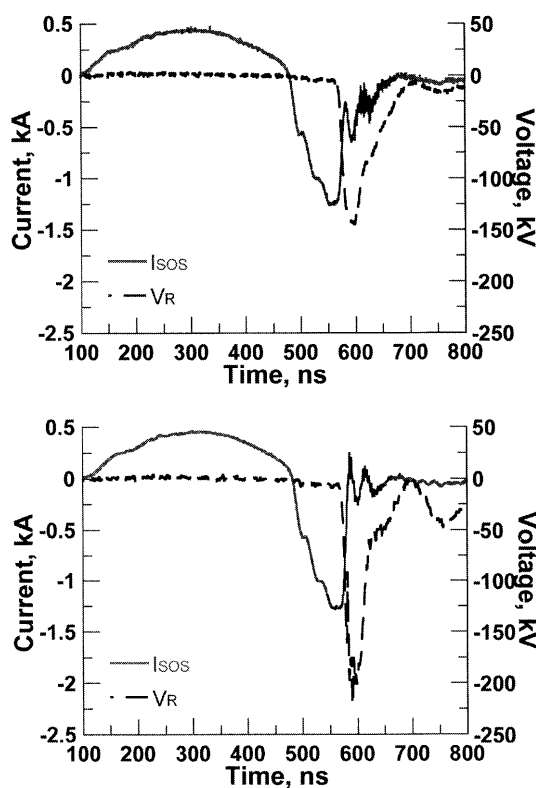


Fig. 6 Typical I_{SOS} and V_R for 300 and 1 kΩ resistive load [9].

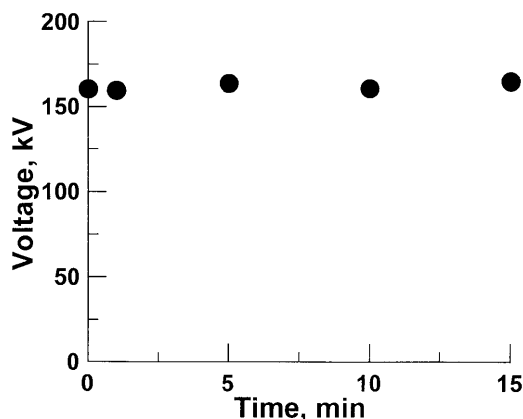


Fig. 7 Long-time operation test [9].

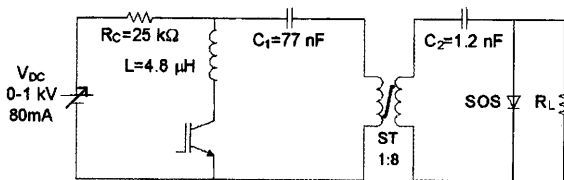


Fig. 8 Low-voltage pulse generator using SOS [10].

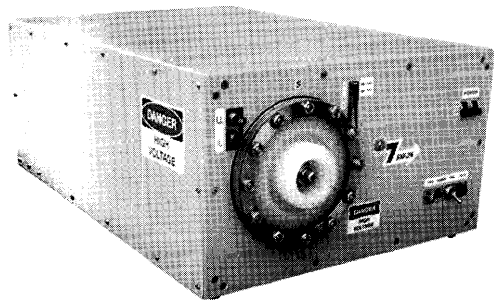


Fig. 9 External appearance of SM-2N generator [5].

Table 4 Specifications of SOS-based generator [5].

	SM-1N	SM-2N	SM-3N	S-5N
Output voltage, kV	200 - 250	100 - 200	200 - 400	400 - 1k
Output current, kA	1.0 - 1.4	0.2 - 0.4	0.5 - 1.5	1.0 - 3.0
Pulse duration, ns	20 - 30	30 - 40	30 - 60	40 - 60
Pulse energy, J	5.0 - 8.0	0.4 - 0.8	8.0 - 10	40 - 60
Pulse rep. frequency (continuously), Hz	100	1000	300	500
Pulse rep. frequency (30-sec burst), Hz	1000	5000	2000	-

Fig. 8は長岡技術科学大学にて開発されたSOSパルス電源の回路図である[10]. 本電源は200Ωの抵抗負荷に対し、最高電圧10kV、パルス幅25nsのパルス電圧を印加可能である。

Fig. 9およびTable 4にはInstitute of Electrophysics, Russian Academy of Scienceにて開発されているSOSパルス電源の外観ならびに諸特性を示す。100kVから1MV、

0.4J/pulseから60J/pulseと幅広い電圧・パルスエネルギーに対応した電源が完成している。なお、本電源の詳細は文献[5, 11]を参照いただきたい。

3.4 まとめ

本章では、近年産業応用を目的とし、開発が急速に進んでいるSOSを用いた誘導エネルギー蓄積型のパルス電源に関して紹介した。SOSダイオードはkA程度の大電流をns程度の短時間にて遮断できるため、高速な立ち上がりを有するパルス電圧の発生が可能である。そのため排ガス処理やエキシマレーザの励起源といった気体中放電の産業応用分野にて大いに普及が期待されるパルス電源である。

また、最近ではSOSダイオードではなく一般の高速整流素子をSOS素子として適用する試みも始まっており[12]、今後、安価なSOSパルス電源の開発も期待される。

参考文献

- [1] S.A. Darznez, G.A. Mesyats and S.N. Rukin, *Tech. Phys.* **42**, 1170 (1997).
- [2] S.A. Darznez, S.N. Rukin and S.N. Tsyanov, *Tech. Phys.* **45**, 436 (2000).
- [3] A.V. Ponomarev, S.N. Rukin and S.N. Tsyanov, *Tech. Phys. Lett.* **27**, 857 (2001).
- [4] I.V. Grekhov and G.A. Mesyats, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28**, 1540 (2000).
- [5] URL: <http://eng.iep.uran.ru/>
- [6] K. Takaki, T. Sasaki, S. Kato, S. Mukaigawa and T. Fujiwara, *24th International Power Modulator Symposium*, Hollywood, USA (2002) p.575.
- [7] K. Takaki, M. Hosokawa, S. Mukaigawa and T. Fujiwara, *15th Symposium of The Materials Research Society of Japan*, Tokyo, Japan (2004) p.146.
- [8] E.H. Baksht, A.N. Pachenko, V.F. Trasenko, T. Matsunaga and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 3701 (2002).
- [9] Y. Teramoto, D. Deguchi, I.V. Lisitsyn, T. Namihira, S. Katsuki and H. Akiyama, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 4464 (2001).
- [10] K. Yatsui, *IEEJ Trans. Fundam. Mater.* **125**, 9 (2005).
- [11] S.N. Rukin, *Instrum. Exp. Tech.* **42**, 439 (1999).
- [12] Y. Teramoto, H. Urakami, S. Katsuki, T. Namihira and H. Akiyama, *IEEE 25th International Power Modulator Symposium*, USA (2002) p.210.