

小型高繰り返しパルスパワー発生装置の開発

廣野 佳那子*, 伊藤 優太*, 佐久川 貴志*¹, 秋山 秀典*, 上野 崇寿**

(2011 年 7 月 5 日受付; 2011 年 10 月 7 日受理)

Development of Compact and High-Repetition Rate Pulsed Power Modulator

Kanako KOUNO*, Yuta ITOH*, Takashi SAKUGAWA,*¹ Hidenori AKIYAMA*
and Takahisa UENO**

(Received June 5, 2011; Accepted October 7, 2011)

Recently, pulsed power generators for industrial applications have been developed. Here, a compact and reliable pulsed power generator operated with the high repetition rate is developed using a magnetic pulse compression circuit (MPC). In order to minimize the generator volume, compact magnetic cores and discrete ceramic capacitors are mounted on a substrate. The voltage risetime of 40 ns, output voltage of 11.5 kV and repetition rate of 2 kpps are obtained with the generator volume of $260 \times 200 \times 70 \text{ mm}^3$.

1. はじめに

時間的・空間的に圧縮された電磁エネルギーであるパルスパワーを用いて、従来には無い新しい応用分野や総量としては少ないエネルギー量で巨大電力でしか成し得なかったような応用分野が多数提案されている。従来のパルスパワーによるプラズマ生成では、高エネルギー密度プラズマからの X 線や高エネルギー粒子ビームなど、その動作領域は 100 kV を超える高電圧でかつ MA 級の大電流が使われてきた。しかし、近年の産業応用を目指したパルスパワー応用研究では、比較的低電圧 (30 kV 以下) で低電流 (1 kA 以下) を用いて、パルスストリーマ放電、パルスアーク放電、パルス電磁界等が生成されている¹⁻⁴⁾。具体的には、パルスパワーのバイオへの作用の解明、オゾン生成、排ガス処理、衝撃波生成、水処理等の研究が行われている⁵⁻⁸⁾。

このような産業応用を実現するためには、パルスパワー電源の小型化、高繰り返し化、及び長寿命化が不可欠である。特にフィールド上での直接処理や車載用オゾナイザ、バイオ医療等への応用を考慮すると、十分に運搬可能なサイズのパルスパワー電源開発が求められている。

従来、パルスパワー電源のスイッチにはギャップスイッチやサイラトロンなどの気体放電を利用したものが多く用いられてきた。しかし安定的に高繰り返し動作が可能なパルスパワー電源が必須となる産業分野にこれらの気体放電スイッチを適用するには、スイッチ寿命や安定動作において問題があった。1980 年代後半からパルス放電励起気体レーザの電源回路にパワーデバイスと呼ばれる半導体スイッチを適用する研究開発が盛んに行われた⁹⁻¹¹⁾。ほぼ同時期に磁気スイッチとしてパルスパワー用途に開発された磁気特性に優れた磁性材料が開発されてきた^{12,13)}。その結果、現在の半導体リソグラフィ用エキシマレーザの駆動には大容量半導体スイッチと磁気パルス圧縮回路 (MPC) から成る高繰り返しパルスパワー発生装置が搭載されている^{14,15)}。

この磁気スイッチを用いたパルス圧縮回路については、多くの報告があり^{16,17)}、古くは大型の鉄系磁心材で絶縁油に浸したシルククロスや高分子フィルムを用いた層間絶縁等が使われ、現在ではエキシマレーザで使われている磁気特性の優れた磁性材料が使われている。さらに、磁性材料の特性向上と SiO₂ 絶縁コーティング等の後処理行程の発達から、パルスパワー機器に利用できる磁心材^{18,19)}が開発されている。しかし、これら特性の優れた磁心材を用いたパルスパワー回路の報告例がほとんど無く、我々が目指している基板実装可能な小型磁気パルス圧縮回路用磁心材の適用や特性評価に関する報告は皆無である。コンデンサについても同様に基板実装における適用評価の報告は見当たらない。

本研究においては、パルスパワーの産業応用を実現するために、持ち運び可能な超小型の磁気パルス圧縮方式パルスパ

キーワード : パルスパワー, IGBT, 磁気パルス圧縮回路

* 熊本大学 (860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan

** 大分工業高等専門学校 (870-0152 大分県大分市大字牧 1666 番地)

Oita National College of Technology, Maki 1666, Oita 870-0152, Japan

¹ sakugawa@cs.kumamoto-u.ac.jp

ワー電源を開発した。高信頼性、高繰り返し動作、及び長寿命という特徴は堅持している。このパルスパワー電源は、コマンド式充電部、半導体スイッチング回路部、磁気パルス圧縮回路部、コントローラ部、及び放電負荷の5つで構成されている。半導体スイッチング回路部に用いた自己消弧能力を有するディスクリート型絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor) を基板上に実装することで小型化を図った。

MPC 回路のコンデンサとして基板実装可能なディスクリート型のコンデンサを採用し、可飽和インダクタには従来のパルスパワー電源用コアに比べ小型な MP3210VF3T, MP3210V4AS を用いたことで MPC 回路の小型化を達成した。

2. パルスパワー電源システム

パルスパワー電源は、充電電圧や繰り返し周波数を決めるコントローラ (Controller) 部、コマンド型の充電器 (Charger) 部、放電負荷部 (Load), 及び IGBT スwitchング回路部と磁気パルス圧縮回路 (MPC) 部から成るパルスモジュレータ (PPM) から構成される。Charger から PPM へ最大入力電圧 700 V で供給されたエネルギーは PPM において出力電圧約 12 kV に昇圧・パルス圧縮され、Load へ出力される。このとき、パルス発生タイミングは Controller からのトリガ信号によって行われる。システム全体の構成図を図 1、装置の仕様を表 1 に示す。

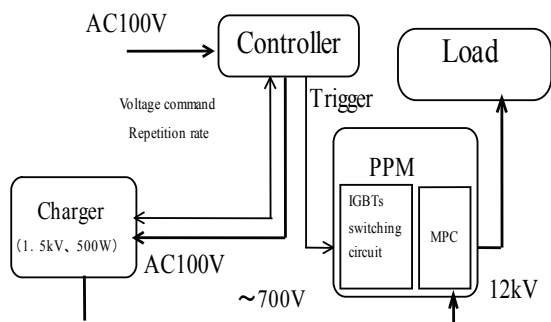


図 1 システム構成図

Fig.1 Block diagram of compact pulsed power system.

表 1 パルスパワー電源の仕様

Table 1 Specifications of PPM.

Parameter	Value
Input voltage	~700 V
Repetition rate	~2000 pps (pulses per second)
Charging Energy	~0.1 J/s
Voltage rise time	< 30 ns
Output voltage	~12 kV

3. 半導体スイッチング回路

3.1 スwitchング回路設計

パルスパワー電源に用いられていたサイラトロン等の放電スイッチは、寿命と安定性で問題がある。半導体パワーデバイスの高性能化・高電圧化により、パルスパワー電源にも用いられるようになってきた。また、放電スイッチの基板実装は不可能だが、ディスクリート型パワーデバイスは基板実装が可能であり、電源小型化の面でも重要な利点となる。

サイリスタは出力容量を多くとることができるが、一度 ON 状態になると電流が 0 になるまで ON 状態を維持するため高繰り返し運転は難しい。そこで、PPM の初段スイッチング回路にディスクリート型 IGBT を用いた。IGBT は駆動電力が少なく、高速スイッチング、高耐電圧、及び大電流動作が可能であり、高繰り返し化に適した素子である。またモジュール型と比較すると、ディスクリート型素子は低コストで基板実装によるコンパクト化が可能である。図 2 にモジュール型の素子と本実験で使用したディスクリート型素子の写真を示す。

3.2 スwitchング損失特性

本実験では 3 種類のディスクリート型 IGBT (GT60N322: 東芝製, IXGK100N170: IXYS 製, IXGX32N170H1: IXYS 製) を選定し、スイッチング回路の設計・製作を行った。各 IGBT スwitchの仕様を表 2 に示す。入力電圧は 700 V 一定とした。回路の一次側から二次側への圧縮における電流の最

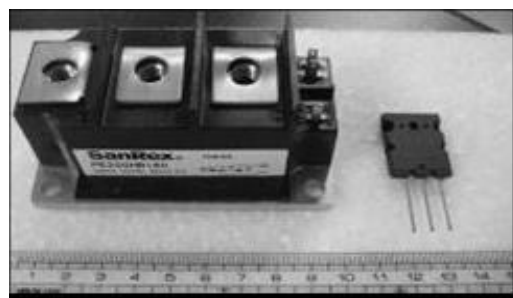


図 2 モジュール型 (左) とディスクリート型 (右) IGBT

Fig. 2 Module type IGBT and discrete type IGBT.

表 2 各 IGBT の仕様

Table 2 Specifications of IGBTs

	GT60N322	IXGK100 N170	IXGX32 N170H1
耐圧	1000 V	1700 V	1700 V
定格電流 (1 ms)	120 A	600 A	200 A
飽和電圧 ($V_{GE}=15$ V)	2.5 V ($I_c=60$ A)	2.5 V ($I_c=100$ A)	2.5 V ($I_c=32$ A)
上昇時間	330 ns	192 ns	38 ns
下降時間	110 ns	395 ns	250 ns
内蔵ダイオード	あり	なし	あり
素子構成	7 並列	2 並列	4 並列
ゲート抵抗 R_g	51 Ω	20 Ω	10 Ω

大値が 650 A 程度となり、それぞれの素子数は表 2 の耐圧及び定格電流に基づき決定した。飽和電圧とは素子が ON 状態のときにコレクタ-エミッタ間にかかる電圧であり、飽和電圧が小さいほど素子の ON 抵抗が小さくスイッチング損失は小さくなる。上昇時間（下降時間）とは素子が OFF (ON) 状態から ON (OFF) 状態へ移行するまでに要する時間であり短いほど高速スイッチングが可能となり、電流パルス幅も短くなる。

スイッチング回路に可飽和インダクタによる磁気アシストを追加接続し、電圧と電流の位相をずらして IGBT のスイッチング損失の低減を図った。図 3-5 に、3 種類のディスクリート型 IGBT を用いた時のスイッチング電流・電圧波形及び算出したスイッチング損失を示す。 V_{ce} はコレクタ-エミッタ間電圧、 I_c はコレクタ電流である。Loss は積算電力損失である。測定にはカレントモニタ（Pearson 社製 Model3972）及び高電圧プローブ（PMK 社製 PHV 641）を用いた。また、IGBT 内蔵ダイオードは素子のターンオフ時に発生する逆起電力を抑える為のものであり、内蔵されていない IXGK100N170 には別途ダイオードを取り付けた。

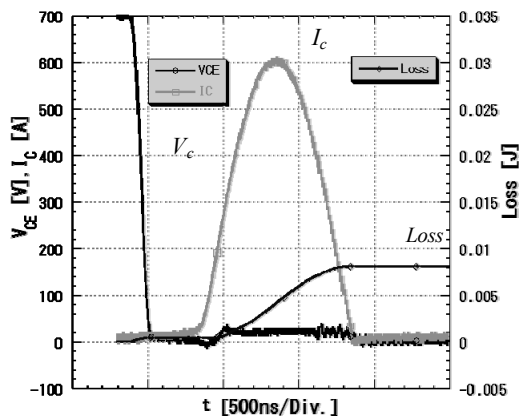


図 3 GT60N322 使用時の電圧・電流・損失波形
Fig.3 The waveforms of voltage, current and switching loss using GT60N322.

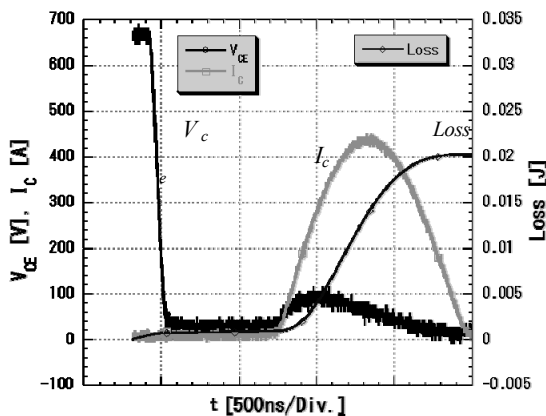


図 4 IXGK100N170 使用時の電圧・電流・損失波形
Fig.4 The waveforms of voltage, current and switching loss using IXGK100N170.

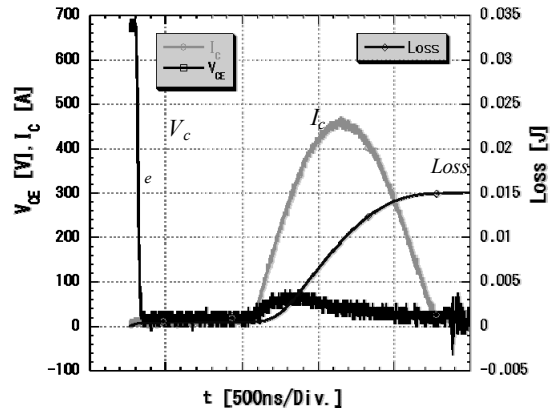


図 5 IXGK32N170H1 使用時の電圧・電流・損失波形
Fig.5 The waveforms of voltage, current and switching loss using IXGK32N170H1.

表 3 IGBT スwitching 特性

Table 3 Switching characteristics of IGBTs.

素子	スイッチング損失	最大電流	アシスト時間
GT60N322	8 mJ	600 A	約 450 ns
IXGK100N170	20 mJ	440 A	約 800 ns
IXGK32N170H1	15 mJ	470 A	約 800 ns

表 3 に図 3-5 を用いて得られた各素子のスイッチング特性を示す。アシスト時間はアシスト用可飽和インダクタ SI_0 の巻き数で調整した。GT60N322（巻き数 2）において、1 パルス当たりのスイッチング損失は 8 mJ であった。IXGK100N170（巻き数 5）、IXGK32N170H1（巻き数 5）においてはそれぞれ 20 mJ, 15 mJ であった。また、GT60N322 に比べ、電流が流れ始める時に IXGK100N170 では 100V, IXGK32N170H1 では 60V 程度のサージ電圧が発生する。IGBT はゲート抵抗を大きくするとサージ電圧が減少する性質があるが、可飽和インダクタのターン数を増やしアシスト時間の延長やゲート抵抗の調整を行っても、この特性に変化は見られず、素子特有の性質であると判断した。

素子が ON 状態のときにコレクタ-エミッタ間にかかる飽和電圧が小さいほど素子の ON 抵抗が小さくスイッチング損失は小さくなる。表 2 の飽和電圧はコレクタ電流によって異なるので飽和電圧をコレクタ電流で除したものを便宜的に ON 抵抗とすると、3 種類の中で最も ON 抵抗が小さいのは IXGK100N170 である。しかし素子の並列数が少ないので素子にかかる電流が大きくなり、飽和電圧はコレクタ電流に依存することからスイッチング損失は大きくなった。つまり並列素子数を増やし、素子にかかる電流を分散させることが損失を抑えることにつながる。小型化という観点も考慮して、適切な並列数でスイッチングする必要がある。GT60N322 は他の素子と比べサージ電圧が小さく、 SI_0 の巻き数を減らし、

アシスト時間を短くすることができる。そのため巻き線のインダクタンス成分は小さく、パルスピーク電流は増加する。スイッチング損失はIXYS製IGBTの半分程度となることから3種類の中で最もスイッチング特性の優れたGT60N322を本装置のスイッチング回路に選定した。

4. 磁気パルス圧縮回路 (MPC)

本研究で作製した2段磁気パルス圧縮回路の概略を図6に示す。また、スイッチング回路のコンデンサ C_1 , C_2 , C_p にはディスクリット型高圧積層コンデンサ (ムラタ製作所製 DHS4 E4G202KT2B) を用いた。 C_0 にはポリプロピレンコンデンサ (Arcotronics社製 C4CAWUD3560AA3J) を用いた。図7にモールド型コンデンサ (左の写真) と今回使用したディスクリット型高圧積層コンデンサ (右の写真) を示す。従来MPCに用いられるモールド形コンデンサに比べ小さく、基板実装可能なことが利点として挙げられる。

回路動作はまず、充電器を用いて C_0 を所定の電圧で充電した後、基板上に実装された7並列のIGBTスイッチをONして初期パルスを発生する。コンデンサ容量は $C_0=560\text{nF}$, $C_1=1\text{ nF}$, $C_2=1\text{ nF}$, $C_p=1\text{ nF}$ とし、パルストランス (PT) の一次側、二次側の巻数比は1:24とした。 SI_0 (巻き数3) は磁気アシスト用の可飽和インダクタである。PTにより昇圧された電圧は C_1 に転送される。 C_1 が充電されている時間はパルス圧縮用の可飽和インダクタ (SI_1 : 巻き数16) のコアが未飽和で高インダクタンスの状態である。そのため C_2 への漏れ電流はほとんど無く、 C_1 を効率よく充電することができる。 C_1 の充電電圧が最大値になったとき、 SI_1 が未飽和 (OFF) から飽和 (ON)

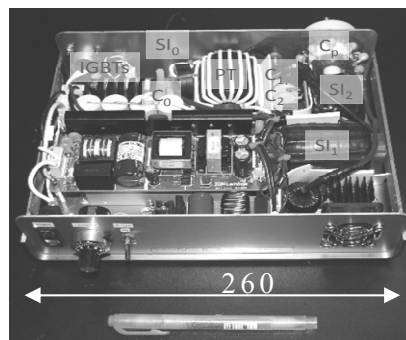


図8 PPM 内部写真

Fig. 8 The picture of PPM.

状態となり、 C_1 から C_2 にエネルギー転送が始まる。同様に、 C_2 の充電電圧が最大となったとき、 SI_2 が飽和状態となり、 C_2 から C_p へのエネルギー転送が始まる。その後、負荷にパルスパワーが印加される。PPMの内部写真を図8に示す。 SI_0 , PT, SI_1 にはナノ結晶Fe基軟磁性材料 (MP3210VF3T) を使用している。また、最終段に使用する可飽和インダクタ SI_2 には3種類の磁心材を使用し、それぞれの圧縮特性を調べた。負荷には 300Ω の無誘導抵抗負荷を用いた。

5. 実験結果

図9に、MPCの各コンデンサ C_0 , C_1 , C_2 にかかる電圧波形を示す。各コンデンサの測定には高電圧プローブ (Tektronix社製 P6515A) を用いた。 C_0 が700Vに充電された後IGBTがONになると、PTにより昇圧された高電圧で、 C_1 が16kVまで充電される。その後 C_1 から C_2 にエネルギーが転送され、 C_2 は12kVまで充電される。 C_0 から C_1 へのエネルギー転送時間は約1 μs , C_1 から C_2 へは約90nsであり、ほぼ設計値と同様となった。ここでエネルギー転送時間は各コンデンサの電圧が10%から90%まで上昇する時間として定義する。

次に、可飽和インダクタ (SI_2) として3種類 { (MP3210VF3T (巻き数2), MP3210V4AS (巻き数5), Aco-5sh (巻き数5))

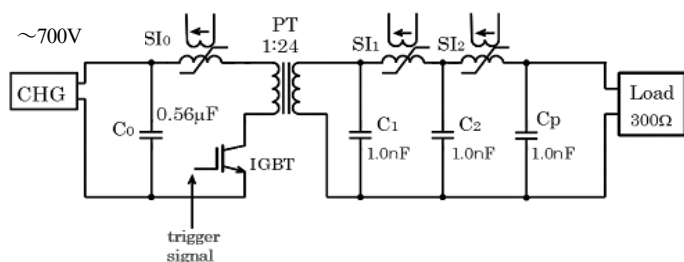


図6 PPM 回路図

Fig.6 Schematic circuit of PPM.

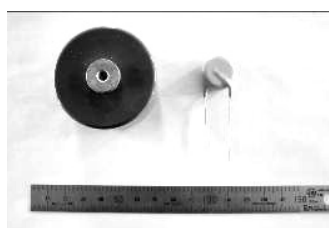


図7 充放電用コンデンサ比較写真

Fig.7 The picture of capacitor comparison.

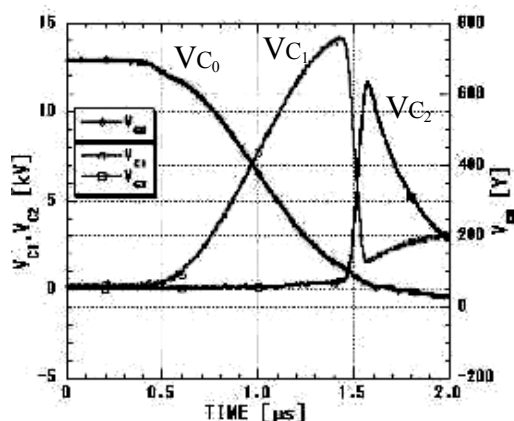


図9 コンデンサ C_0 , C_1 , C_2 の電圧波形

Fig. 9 Voltage waveforms of C_0 , C_1 , and C_2 .

表 4 各コアの物理特性^{13,18,19)}

Table 4 Physical properties of cores.

	鉄系超微 結晶質 (MP3210 VF3T)	コバシト系 アモルファス (MP3210 V4AS)	コバシト系 アモルファス (Aco-5sh)
磁心有効断面積 (Am)	40.7 (mm ²)	38.8 (mm ²)	201.3 (mm ²)
コア 1 個あたり の Vt 積	80×10^{-6} (Vs)	35×10^{-6} (Vs)	220×10^{-6} (Vs)
飽和磁束密度(B_s)	1.23 (T)	0.57(T)	0.6 (T)
未飽和時の比透 磁率(μ_r)[100kHz]	5000	80000	10000
損失[100kHz]	80 (W/kg)	45(W/kg)	58 (W/kg)
外形	35 (mm)	35(mm)	65 (mm)

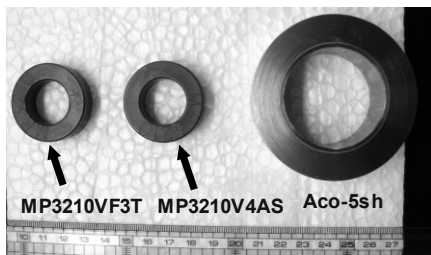


図 10 コアの写真

Fig. 10 The picture of cores.

のコア材を使用し、 C_p の両端電圧 (V_{Cp}) を比較した。このうち MP3210VF3T, MP3210V4AS は主にマグアンプ等に使用されており、従来のパルスパワー用電源に用いられているコアに比べ、より小型で低損失のコアである。Aco-5sh は従来のパルスパワー用電源に用いられているコアである。

表 4 に各コア材の物理特性^{13,18,19)}、図 10 に各コアの写真、図 11 に 3 種類のコアを用いた場合の電圧 (V_{Cp}) 波形を示す。

SI_0 , SI_1 として使用した MP3210VF3T を同様に SI_2 に用いると、他のコバシト系のコア (MP3210V4AS, Aco-5sh) に比べ電圧の上昇時間が長く、出力電圧も小さいことからパルス圧縮がされていないことが分かる。これは未飽和時 (OFF) の透磁率が小さいため、未飽和時にリーク電流が負荷に流れていることが挙げられる。未飽和時の透磁率が大きいコバシト系のコアではパルスの圧縮が行われており、MP3210V4AS では出力が最も大きく約 11.5 kV であり、電圧の立ち上がり時

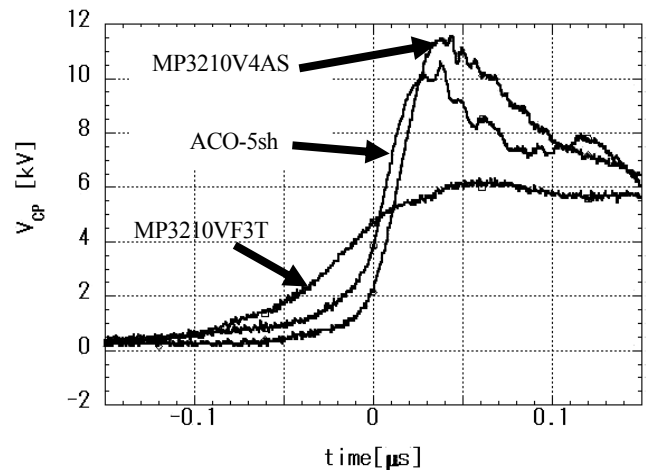
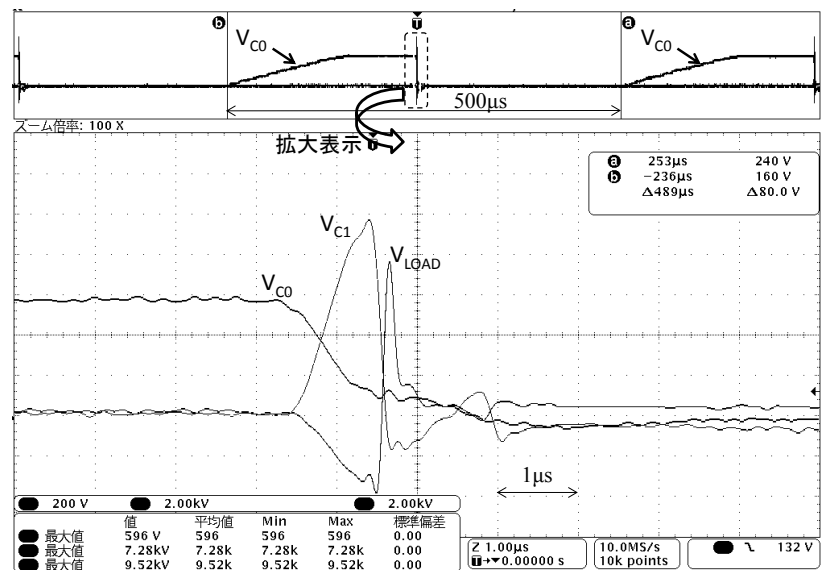
図 11 コンデンサ C_p 出力特性Fig.11 Voltage waveforms of C_p .

図 12 各部の高繰り返し電圧波形

Fig. 12 Voltage waveforms of C_0 , C_1 and LOAD at high-repetition rate.

間も Aco-5sh に比べ短いことから、MP3210V4AS が SI_2 として最も適している。つまり、数十ナノ秒までのパルス圧縮に最も適した磁心材は動作磁束密度よりも未飽和時の透磁率の高さ、つまりスイッチとしての性能が高いコアを選定することが重要であるといえる。MP3210V4AS の出力電圧上昇時間は約 40 ns である。

開発した小型 PPM の高繰り返し動作試験を 2000 pps の動作周波数で行った。その結果を図 12 に示す。波形は各コンデンサ電圧 (V_{C0} , V_{C1}) と負荷電圧 V_{LOAD} を示す。上図の V_{C0} 波形の充電間隔が 500 μ s であり、2,000 pps の高繰り返しで動作しているのがわかる。下図は上図破線部で囲った部分の拡大波形である。

C_0 から 300 Ω の負荷抵抗への最大エネルギー転送効率は、MP3210V4AS を用いた時が最も高く、48 %に達した。損失は、 SI_0 , SI_1 , SI_2 , PT 及び IGBT によっており、 C_0 から C_1 へのエ

エネルギー転送での損失が30%と最も大きい。

6. まとめ

高繰り返し運転が可能で長寿命な小型パルスパワー電源の開発を行った。装置の特徴および試験結果を以下にまとめる。

- ・ 磁気パルス圧縮回路の最終段に使用する可飽和インダクタに、未飽和時の透磁率の高いコバルト基アモルファスコアを用いて出力電圧は11.5 kV、電圧立ち上がり40 ns以下を得た。数十 ns オーダーでのパルス圧縮に最も適した磁心材は動作磁束密度よりも未飽和時の透磁率の高さ、つまり磁気スイッチとしての性能が高いコアを選定することが重要であるといえる。
- ・ MPC回路に基板実装可能なディスクリット型のコンデンサを採用し、磁気スイッチには従来コアに比べ小型なMP3210VF3T, MP3210V4ASを用いたことでMPC回路の小型化を達成した。PPMの筐体寸法は幅260 mm×奥行き200 mm×高さ70 mmで、重量3 kgとなった。
- ・ 自己消弧能力を持つ3種類のIGBTのスイッチングを評価し、その中で特性の良い、低損失のIGBTを小型PPMに採用した。開発した小型PPMの繰り返し動作試験を行い、2,000 ppsの高繰り返し動作を確認した。

今後更なる損失低減及び短パルス化のための改善を行い、オゾン生成への最適化実験を行う必要がある。また、より小型で安価な高繰り返しパルスパワー電源の開発は、小型脱臭装置等実生活に必要な様々な応用につながると期待される。

参考文献

- 1) 佐久川貴志, 山口貴弘, 山本邦博, 崔再九, 喜屋武毅, 浪平隆男, 勝木淳, 秋山秀典: パルスパワーを用いたストリーマ状水中放電プラズマの生成. 電気学会論文誌 A, **126** (2006) 703
- 2) H. Akiyama, S. Sakai, T. Sakugawa, and T. Namihira: environmental applications of repetitive pulsed power. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **14** (2007) 825
- 3) W. Jiang, K. Yatsui, N. Shimizu, K. Iida and A. Tokuchi: Compact pulsed power generators for industrial applications. Proc. IEEE Pulsed Power Conference, p.261 (2003)
- 4) M. Gundersen, J. Dickens and W. Nunnally: compact, portable pulsed power: physics and applications. Proc. IEEE Pulsed Power Conference, p.9 (2003)
- 5) 秋山秀典, 勝木 淳, 浪平隆男, 石橋和生, 清崎典昭: パルスパワー生成水中放電ストリーマ状放電プラズマによる湖沼浄化. J. Plasma Fusion Res., **79** (2003) 26
- 6) H. Akiyama, Z. Li, T. Ohno, X. Lin, H. Sato, T. Namihira, T. Sakugawa, S. Katsuki and H. Takano: Water-bloom treatment by underwater pulsed streamer-like discharges. IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, p.324 (2007)
- 7) 浪平隆男, 勝木 淳, 秋山秀典, 岡元和文: パルスアーク放電プラズマによる NO 生成と医療への応用. J. Plasma Fusion Res., **79** (2003) 35
- 8) 田中文章, 上田 悟, 廣野佳那子, 佐久川貴志, 秋山秀典, 木下洋平: パルスパワー方式高発生量コンパクトオゾンナイザの開発. 電気学会論文誌 A, **130** (2010) 579
- 9) T. Hatakeyama, E. Murata, E. Fujiwara and H. Deguchi: All solid state power driver applied SI-thyristors for copper vapor laser. Proc. of IPEC Tokyo, p.312 (1990)
- 10) H. Hatanaka, H. Tanaka, M. Obara, K. Midorikawa and H. Tashiro: A 1-kpps transversely excited atmospheric CO₂ Laser excited by an all-solid-state exciter with a magnetic pulse compressor. J. Appl. Phys., **68** (1990) 1456
- 11) 岩田明彦, 鈴木弘一, 殖栗成夫: パルスレーザ用ダイレクトドライブパルサの開発. 電気学会論文誌 D, **113**, (1993) 23
- 12) 中島 晋, 平尾則好, 香川理人, 渡部俊太郎: ファインメットを用いたパルスパワー用磁気スイッチ磁心の動特性. 日立金属技報, **8** (1992) 31
- 13) アライドシグナル社: METGLAS 技術資料
- 14) W. Partlo, R. Sandstrom, I. Fomenkov and P. Das: A low cost of ownership KrF excimer laser using a novel pulsed power and chamber configuration. Proc. SPIE, **2440** (1995) 90
- 15) H. Mizoguchi, O. Wakabayashi, T. Aruga, T. Sakugawa and T. Koganezawa: High power KrF excimer laser with a solid state switch for microlithography. Proc. SPIE, **2726** (1997) 831
- 16) W.S. Melville: The use of saturable reactors as discharge devices for pulse generators. Proc. IEE Radio Section, **98** (1951) 185
- 17) W.C. Nunnally: MAGNETIC SWITCHES AND CIRCUITS. Los Alamos National Laboratories Report, LA-8862-MS (1981)
- 18) Metglas Inc.: Amorphous & Nanocrystalline Tape Wound Cores, Catalogue
- 19) Hitachi Metals Ltd.: Nanocrystalline soft magnetic material FINEMET. Brochure, No. HL-FM10-D (2005)