

高電圧・高周波パルス電源の技術紹介

笹本栄二 Eiji Sasamoto
長田俊宏 Toshihiro Osada
長谷川勇 Isamu Hasegawa
辻 弘兵 Kohei Tsuji

キーワード パルスパワー, Pulsed Power, 高電圧スイッチ技術, SiC-MOSFET, EUV, プラズマ応用

概要



高電圧・高周波パルス電源

パルス電源は、瞬間的な大電力を出力する装置で、特にプラズマ応用分野（成膜・環境分野など）への適用が進められている。

そこで、近年開発が進んでいるSiC (Silicon Carbide)-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) が有している高速スイッチング特性や低損失特性などに着目し、半導体素子の直列接続技術を確認することで、パルス幅可変 (パルス幅: $0.1\mu\text{s}\sim$)・高周波動作 (繰り返し周波数: $\sim 400\text{kHz}$)・高電圧 (出力電圧: $\sim -10\text{kV}$)・高速動作 (立ち上がり・立ち下がり時間: $30\text{ns}\sim$) を実現し、当社製品群にはないパルス電源の製品・試作開発を行った。応用例として、ポッケルスセルドライバや成膜用パルス電源などがあり、 $-10\text{kV}\cdot 400\text{kHz}$ の高電圧・高周波動作を確認した。

1 まえがき

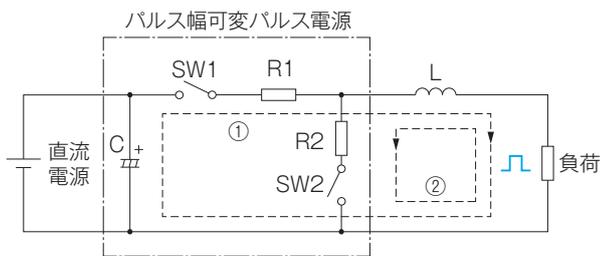
パルス電源とは、マイクロ秒やナノ秒という極短時間のパルス状の大電力を出力する装置で、パルスパワー (Pulsed Power)⁽¹⁾と呼ばれる技術分野で使用され、広く応用が進められている。従来は、レーザ負荷に対応するため、パルス発生回路として磁気パルス圧縮方式を採用してきた⁽²⁾。しかし、容易にパルス幅が可変できず、プラズマ応用分野（成膜・環境分野など）への適用が困難なケースが多かった。

そこで、プラズマ応用分野に適用するため、高電圧スイッチを制御することで、高電圧・高周波動作ができるパルス電源の製品・試作開発を行った。高電圧スイッチには、近年開発が進んでいるSiC (Silicon Carbide)-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を製品に

適用し、直列接続することで高電圧・高周波化を実現した。本稿では、高電圧・高周波パルス電源の動作原理と回路、その応用例を紹介する。

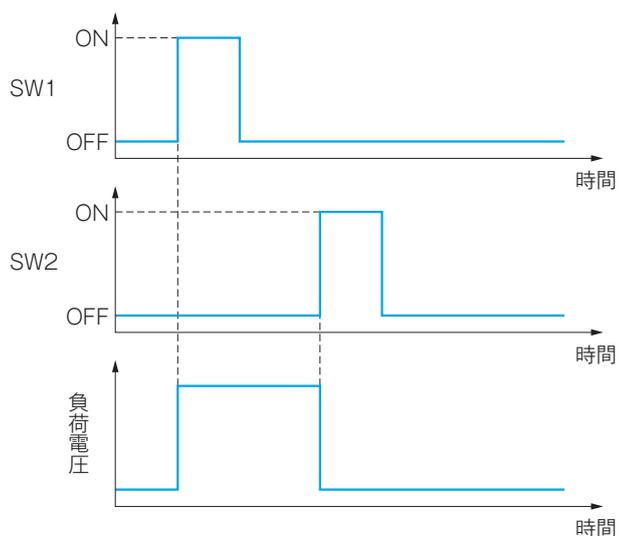
2 高電圧・高周波パルス電源の動作原理

第1図に製品・試作開発した高電圧・高周波パルス電源の主要回路構成を示す。高電圧・高周波パルス電源は、メインスイッチ (SW1・SW2) を用意し、各々をON/OFF制御することで、負荷にパルス状の電圧を印加する装置である。外部から直流電源で電力供給し、応答性により電圧低下がある場合は、コンデンサ (C) を挿入する。抵抗 (R1・R2) は電源と負荷間の浮遊インダクタンス (L) や負荷によって発生するリング防止用に挿入されている。負荷が抵抗性負荷の場合、R2・SW2は不要だが、負



第1図 高電圧・高周波パルス電源回路構成

高電圧・高周波パルス電源の主要な回路構成を示す。



第2図 高電圧・高周波パルス電源動作タイミングチャート

高電圧・高周波パルス電源の動作タイミングチャートを示す。

荷が容量性負荷の場合R2・SW2は必要である。

次に、第2図に容量性負荷を想定した場合の動作タイミングチャートを示す。負荷電圧を立ち上げたい場合、SW1をON、SW2をOFFにする。その時、第1図の破線①のルートで直流電源から負荷に向かって電流が流れ、負荷電圧を立ち上げる。負荷電圧を立ち下げたい場合はSW1をOFF、SW2をONにする。その時、第1図の破線②のルートで電流が流れ、負荷電圧を立ち下げる。

3 スイッチ回路の構成

プラズマ応用分野向けパルス電源は、高速かつ高電圧なパルス出力特性と、高周波動作が要求される。高速とは立ち上がり・立ち下がり時間の短さ(数十ns)、高電圧とはピーク電圧の高さ(数kV～

第1表 パワーデバイス特性比較表

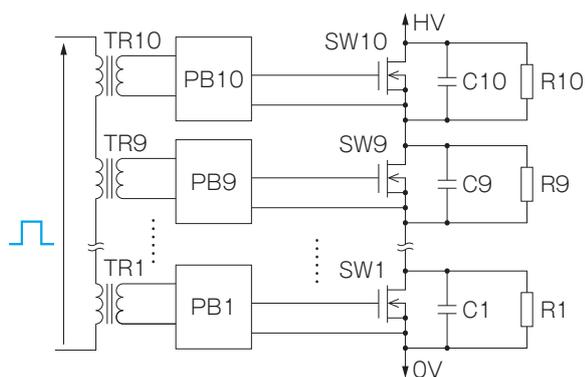
高電圧・高周波パルス電源に適用できるパワーデバイスの特性比較表を示す。

素子素材	Si-MOSFET	SiC-MOSFET			
	No	1	2	3	4
メーカー	A社	B社	C社	D社	
リリース年(年)	2012	2015	2016	2020	2021
定格電圧(V)	1200			1700	
形状	TO-247				TO-247-4L
定格電流(ピーク電流)(A)	12(48)	14(35)	12.5(40)	48(200)	
立ち上がり時間(ns)	11	19	11	10	7
立ち下がり時間(ns)	18.5	29	10	17	
オン抵抗(mΩ)	620	280	160	35	

数十kV)である。第1図の回路方式でパルスを出力する場合、スイッチ回路(SW1・SW2)の特性自体が、パルス出力特性に大きく影響を与える。以下に、高速・高電圧なパルス出力を得るためのスイッチ回路の構成を紹介する。

3.1 パワーデバイスの選定

パルスパワー発生用パワーデバイスは、サイリスタ・IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) や MOSFET などがある⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、デバイス単体で数十ns、数十kVで動作するスイッチはない。高電圧化を素子直列接続して実現する場合、数十nsで動作するパワーデバイスの選定が必要となる。第1表にパワーデバイスの特性比較表を示す。Si (Silicon)-MOSFETでも高速動作できるが、ON抵抗が大きく、損失が多くなる。また近年、SiC-MOSFETの技術革新が進んでいる。素子のリリース時期や各装置スペックに合わせ素子選定を行い、ポッケルスセルドライバ用途にはNo.3、プラズマ応用分野向けパルス電源にはNo.4のSiC-MOSFETを適用した。



C1～C10：コンデンサ
R1～R10：抵抗
PB1～PB10：ゲート駆動回路
SW1～SW10：SiC-MOSFET
TR1～TR10：パルストランス

第3図 スイッチ回路部構成

スイッチ回路部の構成を示す。素子は直列接続とし、ゲート駆動回路はパルストランス方式を採用、電圧分担を考慮し各素子には抵抗とコンデンサが接続されている。

3.2 スイッチ回路部の構成

第3図にスイッチ回路部の構成を示す。スイッチ回路は、素子を直列接続することで高電圧化を実現した。高電圧化を素子直列接続して実現する場合、様々な素子駆動方式がある。各素子を同時にスイッチングしないと電圧分担が崩れ、素子が破損するおそれがあるため、パルストランスで素子を駆動する方式を採用した。また定常時と過渡時の各素子にかかる電圧分担を考慮し、並列に抵抗とコンデンサを接続した。

4 EUV (Extreme Ultraviolet) 光源用ポッケルスセルドライバ

最先端のフォトリソグラフィ光源として、波長13.5nmの極端紫外線EUVがある。当社パルス電源は、EUV光源を制御するポッケルスセルドライバ用として用いられる。第2表にポッケルスセルドライバの主仕様を示す。正極性のパルス電源で、出力パルス幅可変、高速・高電圧パルスを高繰り返しで出力でき、ジッタ（時間軸方向のバラつき幅）が非常に小さい。さらに他社製従来機と比べ、ポッケルスセルドライバ自体の消費電力を900Wから600Wに低減した。

第2表 EUV用ポッケルスセルドライバ仕様

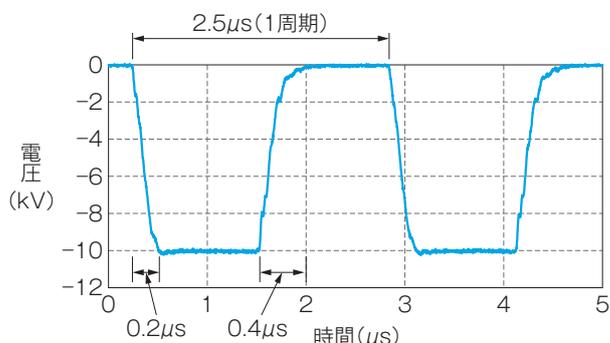
EUV用ポッケルスセルドライバの主仕様を示す。

項目	仕様
出力電圧	0～6kV（可変）
繰り返し周波数	0～120kHz（可変）
負荷容量	10～40pF
出力パルス幅	0.1～2.0μs（可変）
立ち上がり・立ち下がり時間	30ns以下
ジッタ	4ns未満
冷却方式	水冷
質量	16kg以下
外形	W270×H290×D210mm以下

第3表 試作パルス電源仕様

試作パルス電源の主仕様を示す。

項目	仕様
入力電圧・最大容量	0～-10kV（可変）、70kW
出力電圧	0～-10kV（可変）
繰り返し周波数	0～400kHz（可変）
出力パルス幅	0.5μs～∞（可変）
立ち上がり・立ち下がり時間	0.2・0.4μs
冷却方式	水冷



第4図 400kHz動作時の出力電圧波形例

プラズマ応用分野向けパルス電源を400kHzで動作させた場合の出力電圧波形例を示す。出力電圧は、約-10kVである。

5 プラズマ応用分野向けパルス電源

高電圧・高周波パルス電源は、メインスイッチのON/OFF制御によって、パルス状の電圧を出力する装置である。高電圧・高周波化技術が確立していれば、極性・周波数・出力電圧などを要望に合わせて調整できる⁽⁶⁾。近年、プラズマ応用分野向け用途に高電圧・高周波パルス電源の要望があり、試作電源を作成した。第3表に高電圧・高周波パルス電

源の主仕様を、**第4図**に実際の出力電圧波形例を示す。-10kVの高電圧出力と400kHzの高周波動作を確認した。

6 むすび

当社の高電圧・高周波パルス電源の動作原理と回路、その応用例を紹介した。

今後は、お客様の要望に合わせて、更なる高電圧化（～20kV）・高周波化（～1MHz）に取り組んでいく。パルス電源は、本稿で紹介した応用例以外にも空気清浄・水処理など様々な分野で使われており、今後ますます用途が拡大すると予想される。これからも技術の向上に努めるとともに、製品のバリエーションを増やして適用分野の拡大を図っていく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 原・秋山：高電圧パルスパワー工学，森北出版，1991
- (2) 笹本：「パルス電源応用技術」，明電時報323号，2009/No.2，pp.56-61

- (3) 石井：「半導体パルスパワー電源の将来展望」，プラズマ・核融合学会誌，Vol.81，2005/No.5，p.375
- (4) 佐久川・浪平・勝木・秋山・長田・小金沢：「半導体パルスパワー電源のプラズマ応用機器への適用」，プラズマ・核融合学会誌，Vol.81，2005/No.5，pp.350-354
- (5) 江・高木：「パワー半導体デバイスの役割」，プラズマ・核融合学会誌，Vol.87，2011/No.2，pp.106-111
- (6) 笹本・長田・東：「パルス幅可変パルス電源」，明電時報360号，2018/No.3，pp.39-42

《執筆者紹介》



笹本 栄二
Eiji Sasamoto

電子機器営業・技術本部営業部
パルス電源の販売・製品企画に従事



長田 俊宏
Toshihiro Osada

電子機器工場
パルス電源・X線源の開発・設計に従事



長谷川 勇
Isamu Hasegawa

製品技術研究所
パワーエレクトロニクス機器・パルス電源の開発・設計に従事



辻 弘兵
Kohei Tsuji

製品技術研究所
パワーエレクトロニクス機器・パルス電源の開発・設計に従事