

パルス幅可変パルス電源

笹本栄二 Eiji Sasamoto
長田俊宏 Toshihiro Osada
東 征男 Ikuo Azuma

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、成膜

概要



パルス幅可変パルス電源

パルス電源は、瞬間的な大電力を出力する装置で、特にパルス幅可変パルス電源のプラズマ応用分野（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：0.1～2 μ s）、高周波動作（繰り返し周波数：120kHz以下）、高電圧（出力電圧：6kV以下）、高速動作（立ち上がり・立ち下がり時間：30ns以下）を実現し、当社製品群には無いパルス電源の製品開発に成功した。応用例として、ポッケルスセルドライバやプラズマ応用分野があり、要望に合わせて調整することで負極性の電圧パルス出力や400kHzの高周波動作を確認した。

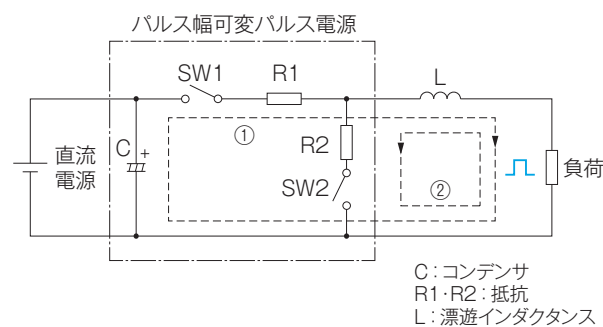
1 まえがき

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ある。このパルス電源は、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い。プラズマ応用分野に適用するため、今回、高圧スイッチを制御することで、高速・高電圧パルスを出力でき、パルス幅可変のパルス電源を製品開発した。高圧スイッチには、近年開発が進んでいるSiC（Silicon Carbide）-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を当社で初めて製品として適用し、直列接続すること

で高耐圧化を実現した。本稿では、パルス幅可変パルス電源の動作原理と回路、その応用例を紹介する。

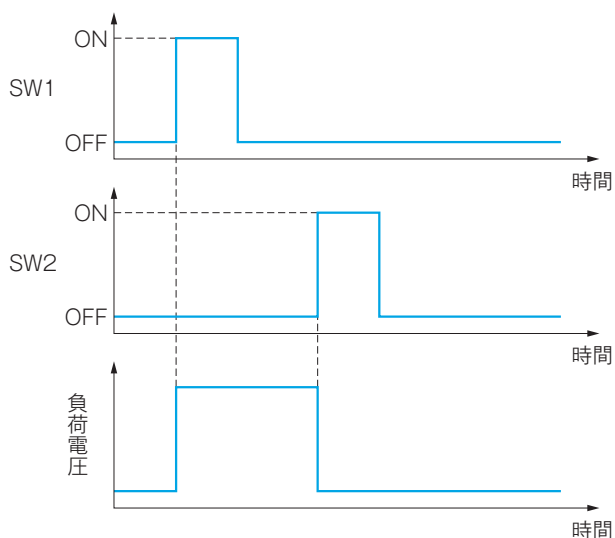
2 パルス幅可変パルス電源の動作原理

第1図に今回製品開発したパルス幅可変パルス電源の主要回路構成を示す。パルス幅可変パルス電



第1図 パルス幅可変パルス電源の回路構成

パルス幅可変パルス電源の主要な回路構成を示す。



第 2 図 パルス幅可変パルス電源の動作タイミングチャート

パルス幅可変パルス電源の動作タイミングチャートを示す。

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。外部から直流電源などで電力供給し、直流電源の応答性によって電圧低下がある場合は C を挿入する。R1・R2 は電源と負荷間の L や負荷によって発生するリンギ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、負荷が容量性負荷の場合 R2・SW2 は必要である。

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としては、パルス幅可変以外に高速かつ高電圧なパルス出力特性が要求される。高速とは、立ち上がり・立ち下がり時間の短さ (数十 ns) であり、高電圧とはピーク電圧

第 1 表 パワーデバイスの特性比較表

パルス幅可変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	
メーカー	A 社	B 社	C 社
定格電流 (ピーク電流) (A)	12 (48)	14 (35)	12.5 (40)
立ち上がり時間 (ns)	11	19	11
立ち下がり時間 (ns)	18.5	29	10
ON 抵抗 (mΩ)	620	280	160

の高さ (数 kV ~ 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。

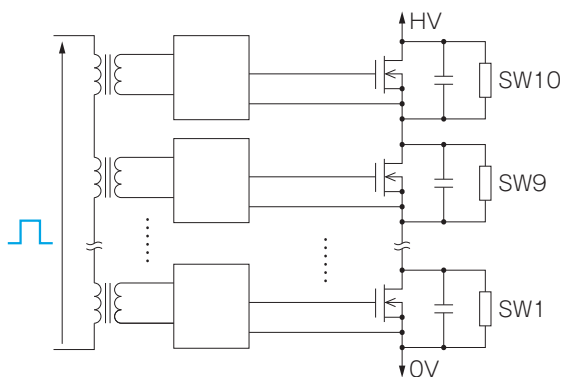
3.1 パワーデバイスの選定

パルスパワー発生用パワーデバイスとしては、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。高耐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い。SiC-MOSFET は各社とも高速動作ができるが、特にカタログ上のスペックが良好な C 社の SiC-MOSFET を適用した。

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。今回、スイッチ回路は 1200V 定格の素子を 10 直列接続することで高耐圧化を実現した。高耐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、各素子には並列に抵抗とコンデンサを接続した。



第3図 スイッチ回路部の構成

スイッチ回路部の構成を示す。素子は10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を接続している。

第2表 EUV用ポッケルスセルドライバ主仕様

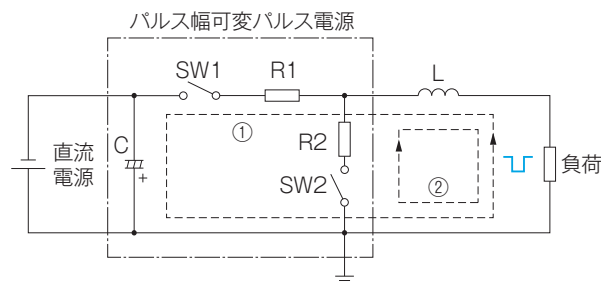
EUV用ポッケルスセルドライバの主な仕様を示す。

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

4 応用例

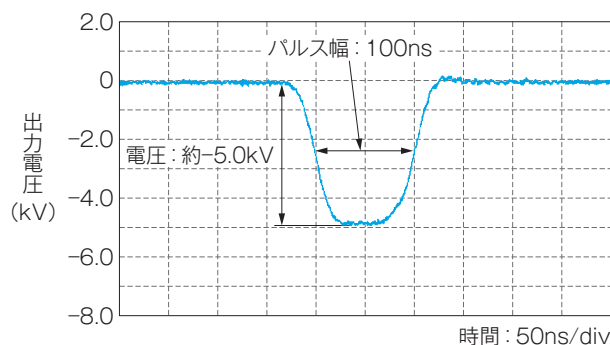
4.1 EUV (Extreme Ultraviolet) 光源用ポッケルスセルドライバ

次世代の最有力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があり、ギガフォトン(株)で研究開発が行われている。当社パルス電源は、EUV光源の制御を行うポッケルスセルドライバ用として用いられている。第2表に現状の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約30%低減した。



第4図 負極性パルス幅可変パルス電源の回路構成

負極性パルス幅可変パルス電源の回路構成を示す。第1図と比較し、若干の回路変更で負極性の電圧パルス出力ができる。



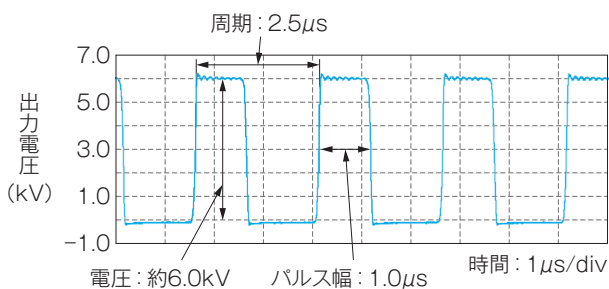
第5図 負極性パルス幅可変パルス電源の出力電圧波形例

負極性パルス幅可変パルス電源の出力電圧波形例を示す。出力電圧約-5.0kV、パルス幅100nsである。

4.2 プラズマ応用分野向けパルス電源

パルス幅可変パルス電源は、メインスイッチのON/OFF制御でパルス状の電圧を出力する装置である。メインスイッチのスイッチ技術が確立していれば、周波数・極性・出力電圧などを要望に合わせて調整することができる。以下に要望に合わせた電源の調整例を紹介する。

当社は、過去に磁気パルス圧縮回路方式でDLC (Diamond-Like Carbon) 成膜実験用途にパルス電源を開発した実績がある⁽⁴⁾。今回、DLC成膜実験用に負極性のパルス幅可変パルス電源の要望があり、電源を調整し納入した。第4図に負極性パルス幅可変パルス電源の回路構成を示す。第1図の正極性回路と比べ、負極性直流電源を別途用意し、装置内部の配線を若干変更することで対応できる。第5図に実際の出力電圧波形例を示す。負極性パルス電圧を出力できることを確認した。



第 6 図 400kHz 動作時の出力電圧波形例

パルス幅可変パルス電源を 400kHz で動作させた場合の出力電圧波形例を示す。出力電圧約 6.0kV である。

また、パルス幅可変パルス電源に対しては、より高い繰り返し動作の要望がある。今回、制御回路内の部品・回路を調整し、400kHz の高周波で動作を確認した。第 6 図に出力電圧波形例を示す。

5 むすび

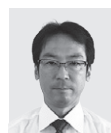
当社のパルス幅可変パルス電源の動作原理と回路、その応用例を紹介した。パルス電源は、本稿で紹介した応用例以外にも空気清浄・水処理など様々な分野で使われており、今後ますます用途が拡大すると予想される。今後も技術の向上に努めるとともに、製品のバリエーションを増やし適用分野の拡大を図っていく所存である。

・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：「DLC 成膜用パルス電源」，明電時報 336 号，2012/No.3，pp.81-85

《執筆者紹介》



笹本 栄二
Eiji Sasamoto
電子機器事業部営業部
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
パルス電源の開発・設計に従事



東 征男
Ikuo Azuma
電子機器工場
パルス電源の開発・設計に従事