

# 次世代型高速半導体スイッチを用いたコンデンサ急速充電電源の開発

戸田颯\* 村中智穂子\*\* 赤松浩\*\*\*

## Development of Fast Capacitor-Charging Power Supply with Next Generation Power Semiconductor

Hayate TODA\* Chihoko MURANAKA\*\*  
Hiroshi AKAMATSU\*\*\*

### ABSTRACT

A capacitor charging power supply for pulsed power generator in high power pulsed sputtering has been developed with next generation power semiconductor. The power supply has a forward type single chopper geometry with a pulsed transformer. Gallium nitride (GaN) HEMT as a high speed power semiconductor was used for chopping device. In addition, GaN HEMT was compared with SiC MOSFET about the switching performance. The condenser charging times for voltage of 800 V were 1 ms for GaN HEMT and 4 ms for SiC MOSFET. The power supply with GaN HEMT has the fastest time for charging voltage of 800 V.

*Keywords* : capacitor charging power supply, next generation power semiconductor, gallium nitride, silicon carbide, high power pulsed sputtering

### 1. はじめに

低気圧プラズマを用いた機能性薄膜形成技術として、1936年にマグネトロンスパッタリング (Magnetron Sputtering: MS)が発見された。図1に、MS技術の推移を示す。MSは、絶縁体薄膜形成を目的とした高周波MS、スパッタ粒子のイオン化を目的としたイオンアシストMS、ホローカソード放電型MS、磁場配置を不均衡としたアンバランスMSなど様々な改良がなされ、今日では半導体製造およびコーティング技術として欠かすことのできない基盤技術となっていた(1,2)。

さて、1999年にMSにおけるメタルプラズマの高イオン化を目的として、大電力パルススパッタリング (High Power Pulsed Sputtering: HPPS)が提案された(3)。この方式では、MS源にキロワット級の大電力かつ数10  $\mu$ sのパルスを印加することにより、メタルプラズマの高イオン化を試みている。メタルプラズマのイオン化率が高くなると、成膜に関わるメタルイオンの比率が

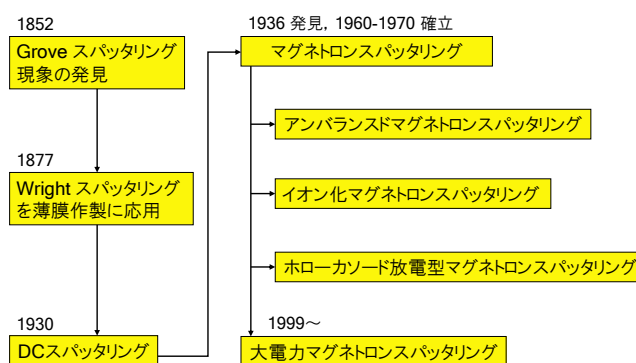


図1 MS技術の推移。

高くなり、ドロップレットの少ない高品質の成膜が可能となる。

HPPSの電源装置に着目すると、コンデンサを用いた容量性エネルギー蓄積方式のパルスパワー電源に分類できる。図2に、一般的なHPPSの電源構成図を示す。電源の動作は、エネルギー蓄積素子であるコンデンサを直流電源によって充電し、パワー半導体スイッチのオンによってMS源にパルス状の大電力を供給する。

\* 電気工学科 研究生  
\*\* 電気工学科 本科生  
\*\*\* 電気工学科 准教授

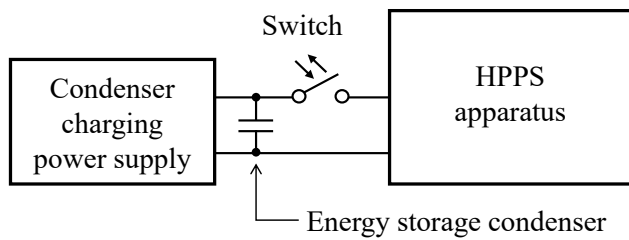


図2 大電力パルススパッタリングの電源構成。

表1 パワー半導体材料の特性。

|   | Si              | 4H-SiC          | GaN               |
|---|-----------------|-----------------|-------------------|
| 比誘電率 $\epsilon$                         | 11.8            | 10              | 9.5               |
| 電子移動度 $\mu$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ] | 1350            | 700             | 1500              |
| 電子飽和速度 [ $\text{cm/s}$ ]                | $1 \times 10^7$ | $2 \times 10^7$ | $2.7 \times 10^7$ |
| 絶縁耐力 $E_c$ [ $\text{MV/cm}$ ]           | 0.3             | 3               | 3.3               |
| バリガ指数(Siを1とする)                          | 1               | 439             | 1128              |

このとき、コンデンサを急速充電できれば、MS源の大電力パルスを高繰り返しで印加することができ、メタルプラズマの高イオン化を促進できると期待できる。

本研究では、コンデンサを急速充電できる直流電源の開発を目的とした。コンデンサ急速充電電源は、出力電圧が800V~1000Vであるため、AC100Vを昇圧・整流する機構が必要である。そこで、昇圧にはパルストランスを用いたフォワード型シングルチョップ回路、整流には半波整流回路を採用した<sup>(4)</sup>。また、コンデンサ急速充電電源の小型化を想定した場合、構成部品の中で最も大きいパルストランスを小型化することが重要である。そのため、シングルチョップに使用する半導体スイッチには、窒化ガリウム(Gallium Nitride: GaN)高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor: HEMT)を採用した。GaNは、表1に示すよ

表2 使用したパワー半導体スイッチの定格。

|   | SiC MOSFET | GaN HEMT  |
|---|------------|-----------|
|   | SCT2120AF  | TPH3206PS |
| ドレイン・ソース間電圧 $V_{DSS}$ [V]                       | 650        | 600       |
| ゲート・ソース間電圧 $V_{GS}$ [V]                         | -6 to 22   | $\pm 18$  |
| 連続ドレイン電流 $I_D$ [A] DC                           | 29         | 17        |
| パルスドレイン電流 $I_D$ [A] Pulse                       | 72         | 60        |
| ドレイン・ソース間オン抵抗 $R_{DS(ON)}$ [ $\text{m}\Omega$ ] | 120        | 150       |

うに炭化ケイ素(Silicon carbide: 4H-SiC)と同様に次世代型高速半導体として従来のシリコン(Silicon: Si)にくらべ性能指数であるバリガ指数が極めて大きいという特徴をもつ<sup>(5)</sup>。GaNを用いて製造されたHEMTは、メガヘルツ級の高速スイッチングが可能であり、パルストランスを磁気飽和させずに昇圧機能を維持できるため、小型のパルストランスを採用できる。

本報告では、シングルチョップにGaN HEMTおよびSiC MOSFETを用いた場合のコンデンサ充電電圧の充電速度を比較した。

## 2. 実験方法

図3に、作製したコンデンサ充電電源の回路図を示す。同図は、半導体スイッチおよびパルストランスを用いたフォワード型シングルチョップである。AC100Vを、スライダックを介し全波整流して1次ストレージコンデンサ  $C_0=1000 \mu\text{F}$  を充電する。半導体スイッチをONすると、コンデンサからのエネルギーがパルストランスの1次巻線に付与され、昇圧されて2次側の半波整流回路を通してコンデンサ  $C=330 \text{ nF}$  を充電する。半導体スイッチには、GaN HEMT (TPH3206PS, Transphorm)およびSiC MOSFET (SCT2120AF, ROHM)を使用した。両半導体スイッチの定格を表2に示す。

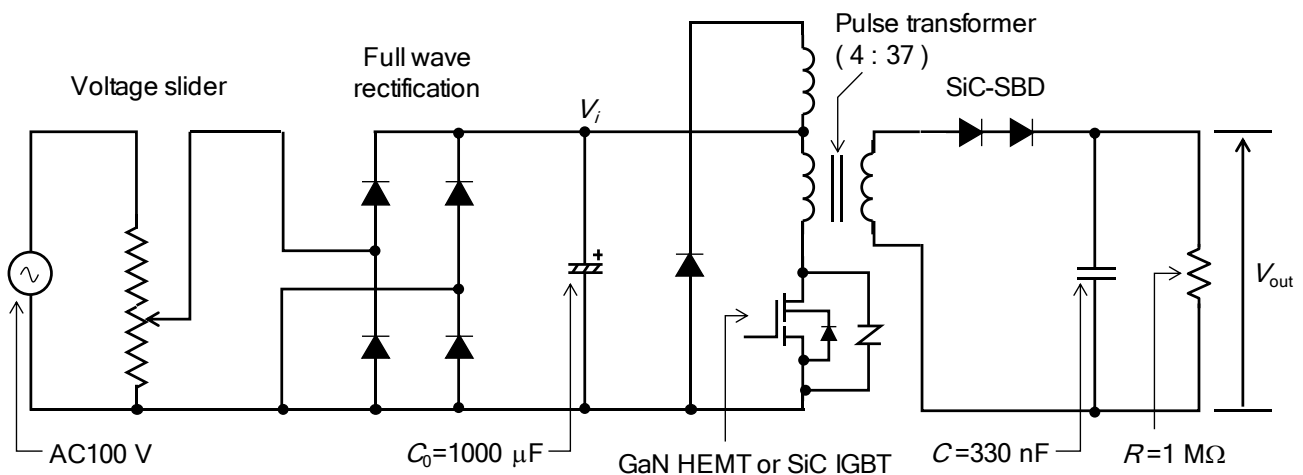


図3 コンデンサ充電回路の回路図。

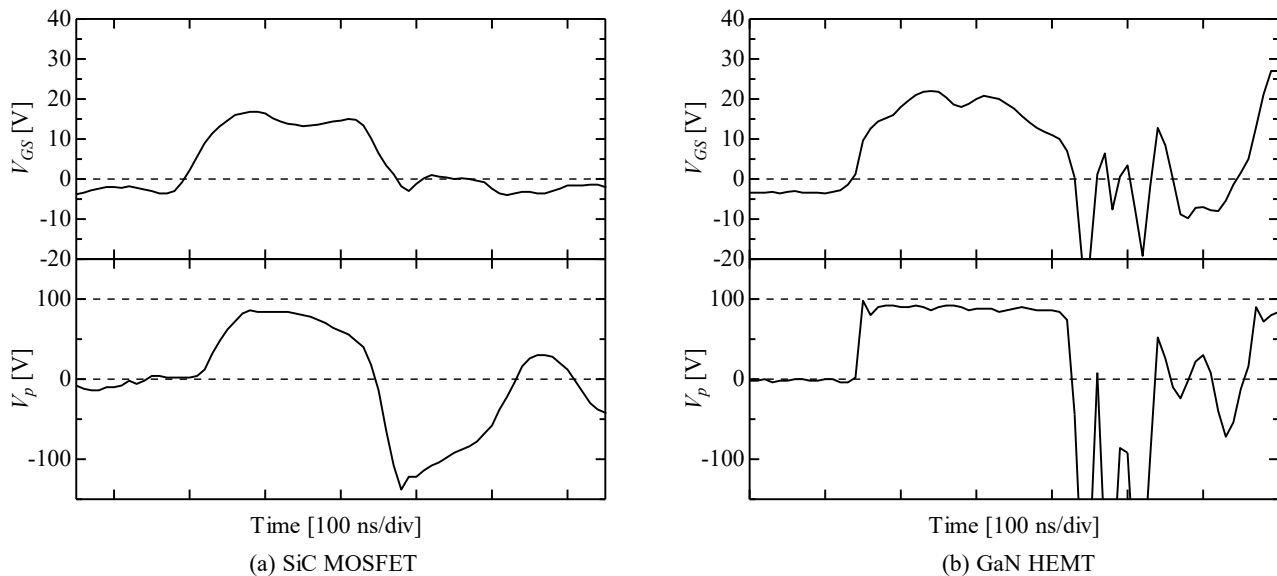


図4 半導体スイッチの  $V_{GS}$  およびパルストランス 1 次コイルの電圧  $V_p$  の波形.

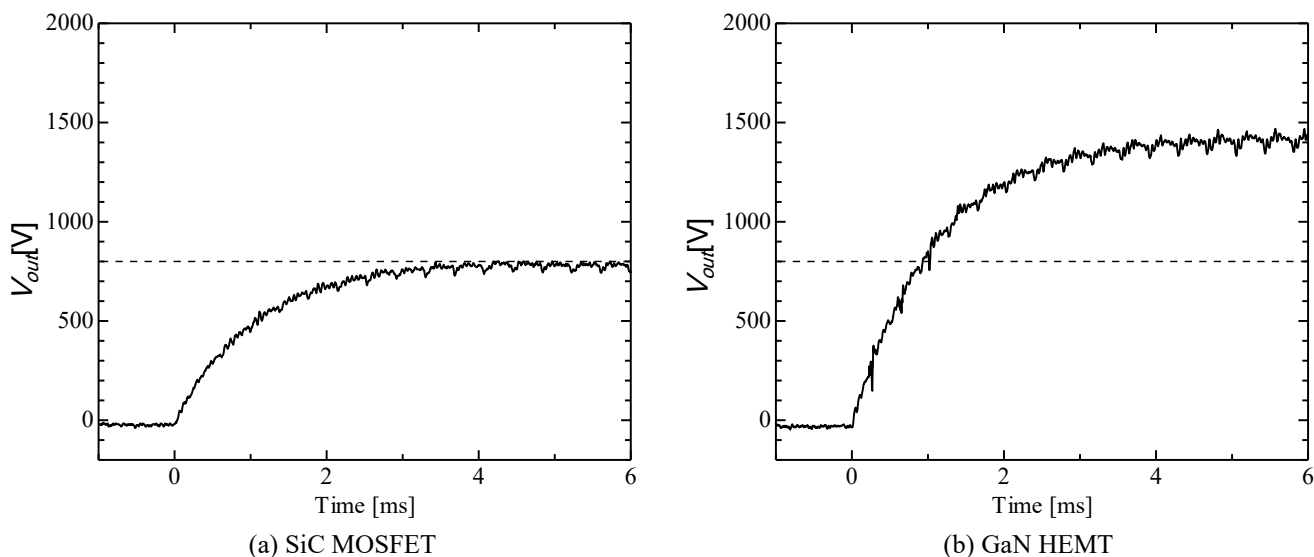


図5 SiC MOSFET および GaN HEMT を用いたときのコンデンサ充電電圧の時間変化.

半導体スイッチの選定基準は、耐電圧が 600 V であることを条件とした。半導体スイッチのゲート駆動回路は、PIC マイコン(PIC16F84A)および光アイソレータ(TLP351)を用いて構成した。ゲート信号は、オン時間 200 ns、周波数を 1 MHz とした。パルストランスは、コアにファインメット(FT-3M, Hitachi Metals)を使用し、1 次および 2 次の巻数をそれぞれ 4 および 37 とした。昇圧比は 9.25 である。また、1 次巻線には、ダイオード(C2D20120D, CREE)を併用したリセット回路も接続している。

コンデンサ充電電源の出力電圧  $V_{out}$  は、高電圧プローブ(HV-P30, Iwatsu)およびオシロスコープ(TDS2024C, Tektronix)でモニターした。

### 3. 実験結果

図 4 に、(a) SiC MOSFET および(b) GaN HEMT を用いた場合における、半導体スイッチのゲート・ソース間電圧  $V_{GS}$  およびパルストランス 1 次コイル電圧  $V_p$  を示す。なお  $V_p$  は、 $V_i - V_{DS}$  として算出した。いずれの場合も、ゲートに電圧が加わると  $V_p$  が立ち上がっている。同図(a)から、SiC MOSFET の場合、 $V_p$  の立ち上がり速度は 1.2 V/ns であった。また、パルス時間は半値幅で 180 ns であった。一方、同図(b)から、GaN HEMT では、 $V_p$  の立ち上がり速度は 9.2 V/ns、パルス時間は 280 ns であった。立ち上がり速度は GaN HEMT が 7 倍程度大きいことがわかった。なお、ゲート信号のパルス時間が 200 ns に対して GaN HEMT の  $V_{GS}$  は 280 ns となったことは調査が必要である。

図 5 に、1 次ストレージコンデンサの充電電圧  $V_i$  を DC100 V としたときの、電源出力電圧  $V_{out}$  の時間変化を示す。同図(a)において、SiC MOSFET では到達電圧が目標電圧である 800 V であり、充電に要した時間は約 4 ms であった。一方、同図(b)より GaN-HEMT を用いたとき到達電圧は 1400 V であり、目標電圧である 800 V までの充電に要する時間は約 1 ms であった。以上から、GaN HEMT を用いた場合は SiC MOSFET の 4 分の 1 の時間で 800 V まで充電できることが分かった。

この原因を考察する。図 4 から、SiC MOSFET の場合、パルストランスの 1 次コイル電圧  $V_p$  は平均 73 V、パルス時間は 180 ns である。一方、GaN HEMT の場合、 $V_p$  の平均値は 89 V でパルス時間は 280 ns であった。以上から、GaN HEMT の方がパルストランスの 1 次コイルに印加される電圧が高く、時間も長いことから目標電圧 800 V までの充電時間を短くできたと考えられる。

#### 4. まとめ

本実験では、パルスパワー電源のエネルギー蓄積コンデンサを急速充電する直流電源をフォワード型シングルチョップ方式回路として作製した。また、シングルチョップに使用する半導体スイッチとして、次世代パワー半導体である GaN HEMT および SiC MOSFET を比較した。実験の結果明らかになったことを以下にまとめる。

- (1) 半導体スイッチのゲート駆動にオン時間 200 ns、周期 1 MHz の信号を用いたとき、SiC MOSFET および GaN HEMT でのパルストランス 1 次コイル電圧のパルス時間はそれぞれ 180 ns および 280 ns であった。

- (2) 1 次側整流電圧を 100 V としたとき、コンデンサ充電電源の出力電圧は SiC MOSFET および GaN HEMT でそれぞれ 800 V および 1400 V であった。
- (3) 出力電圧の目標値 800 V までの充電時間は、SiC MOSFET および GaN HEMT でそれぞれ約 4 ms および約 1 ms であった。
- (4) 本実験において、GaN HEMT(TPH3206PS)は、SiC MOSFET (SCT2120AF)の 4 分の 1 の時間で目標電圧 800 V の充電を達成できた。

#### 参考文献

- (1) 福島志郎, 細川直吉:「スパッタリングの歴史と応用」, 金属表面技術, Vol. 36, No. 6, pp.218-228, 1985.
- (2) 東欣吾:「大電力パルススパッタリングプラズマ源」, 電気学会論文誌 A, Vol. 132, No. 4, pp. 272-277, 2012.
- (3) Vladimir Kouznetsov, Karol Macak, Jochen M. Schneider, Ulf Helmersson, Ivan Petrov: “A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities”, Surf. Coat. Technol., Vol. 122, pp. 290-293, 1999.
- (4) 梶原泰治, 境健太, 佐久川貴志, 秋山秀典:「パルスパワー用シングルチョップ方式超小型キャパシタ充電回路」, 電気学会論文誌 A, Vol. 134, No. 4, pp. 211-216, 2014.
- (5) 山本真義:「ウルトラ・ハイスピード・パワー・トランジスタ GaN HEMT 実験レポート」, トランジスタ技術, 2015 年 2 月号, CQ 出版.