

SiC-MOSFETを用いた小型軽量高電圧パルス発生装置の開発とその応用 Development of compact and lightweight high voltage pulse generator utilizing SiC-MOSFET and its applications

高橋克幸¹, 高木浩一^{1,2}, 黒岩丈晴³, 坂本邦博³

Katsuyuki Takahashi¹, Koichi Takaki^{1,2}, Takeharu Kuroiwa³, Kunihiro Sakamoto³

¹岩手大学理工学部, ²岩手大学次世代アグリイノベーションセンター,

³産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター

¹Faculty of Science and Technology, Iwate University,

²Agri-innovation center, Iwate University,

³Advanced power electronics research center, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology

1. はじめに

非熱平衡プラズマは、反応性に富む化学的活性種を高密度かつ高効率に生成することができる。近年、この特徴を利用した、環境、農業、医療等への応用が盛んに行われている。大気圧において非熱平衡プラズマを生成する手法の一つに、数十ナノ秒程度の急峻なパルス電圧を用い発生するストリーマー放電を利用した手法が利用されている。高電圧パルス発生装置の重要な部品となるスイッチには、スパークギャップスイッチのような気体放電を利用したものが多く用いられてきた。この方式は耐圧や伝送電力の制約がなく、高電圧、大電力の出力が得られる一方で、応用分野への導入にはスイッチ寿命や動作不安定性の観点から困難である。これらの問題点の解決のため、半導体パワーデバイスをパルス発生スイッチとして利用する研究がなされている。しかし、半導体の伝送容量、動作速度はトレードオフの関係にあることから、半導体パルスパワー発生器は高出力と高速動作を同時に実現することは困難であった。

半導体素子の1種であるMOSFETは比較的小容量・高速な素子であり、これまでは半導体構造の工夫により高耐圧化、低損失化を達成してきた。しかし、現状以上の性能を実現するには、現在まで広く使われているシリコン(Si)材料の物性値に起因した性能限界の点から難しい。そこで、Siに代わる材料として、シリコンカーバイド(SiC)が注目されている。SiCはSiと比べて、バンドギャップが約3倍高く、高温動作が可能である。また、飽和ドリフト速度が約2倍であり、スイッチング速度を高めることができる。

さらに、絶縁破壊電界が約10倍高く、同耐圧下で比較した場合、固有オン抵抗を1/1000程度にすることが可能となる。そのため、同耐圧のSiと比較し、単位体積当たりのエネルギー損失も同様に1/1000程度とすることができる。SiCの熱伝導率は3倍ほど大きいので、熱拡散がよく、機器の冷却の省略化も可能である。このように優れた物性値を持つSiCは現在、MOSFETに対する高耐圧化や低損失化の研究が活発に行われており、一部量産化・市販化もされている。

ここでは、耐圧13kV級SiCパワーMOSFET[1]を、誘導性エネルギー蓄積方式(IES)パルス電源のスイッチ素子として利用することで、小型かつ高速・高出力を同時に実現したパルス発生器について紹介する。

2. 回路特性

図1に、IESパルス電源の回路図を、図2にその外観を示す[2]。直流電源(V_{DD})から500k Ω の充電抵抗Rを介し、コンデンサ C_B に電荷が蓄えられる。MOSFETがターン・オンすると負荷抵抗 R_L を介し電流が流れ、一次側インダクタにエネルギーが蓄えられる。MOSFETがターン・オフするとMOSFETのドレイン-ソース間および一次側インダクタに誘導起電圧が印加される。誘起された電圧は、可飽和トランス(日立金属、FT-3H, 断面積 $2.6 \times 10^3 \text{ mm}^2$, 磁路長 $3.2 \times 10^3 \text{ mm}$, 巻き数比5:15)を介して、二次側インダクタへ昇圧され、負荷抵抗 R_L に電流が流れる。1次側回路の上側にはリセット回路を設け、可飽和トランスの残留磁束をリセットさせている。

使用したMOS-FETの立ち上がり時間と立ち下

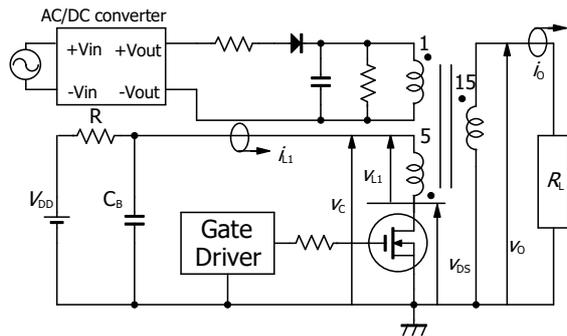


図 1 SiC-MOSFET を用いた誘導性エネルギー蓄積型パルス電源の回路図

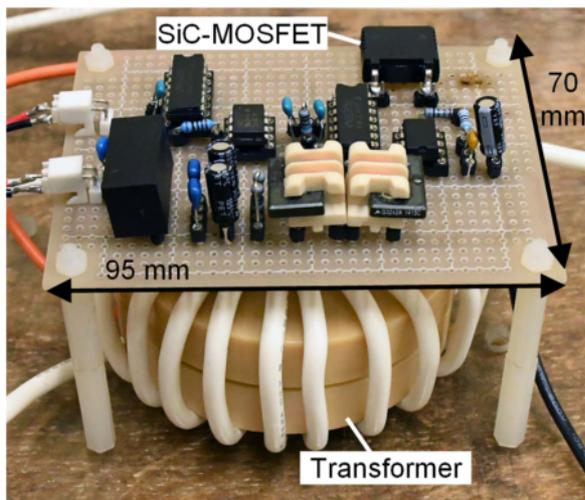


図 2 誘導性エネルギー蓄積型パルス電源の外観

がり時間は50 ns程度であり、高速な電流遮断が可能である。また、立ち下がり時間は、30 A以上の大電流においては、約40 nsと安定して高速動作が確認された。MOSFETの立ち下がり時間はMOSFETの寄生容量であるドレイン-ソース間容量と負荷抵抗 R_L の積に依存する。そのため、負荷電流が小さいほど高速な電流遮断が可能となる。また、ドレイン-ソース間のオン抵抗は室温で 0.86Ω 程度である。

図3に、負荷抵抗を開放したときの回路各部の電圧・電流波形を示す。t = 0 nsから500 nsに到達するまでに i_c は約40 Aとなり、MOSFETのターン・オフ後に v_{DS} 、 v_{L1} の誘導起電圧の最大値が11.7 kV、10.5 kVとなった。可飽和トランスを介して、 v_o の最大値は31.4 kVが得られた。電圧のパルス半値幅は、 v_{L1} が66 nsであるのに対し、 v_o のパルス半値幅は55 nsとなる。エネルギー転送効率は、負荷抵抗 R_L が2.5 k Ω において最も高効率であり、50%が得られた。これは軽負荷では出力電流が小さいため、負荷抵抗での消費エ

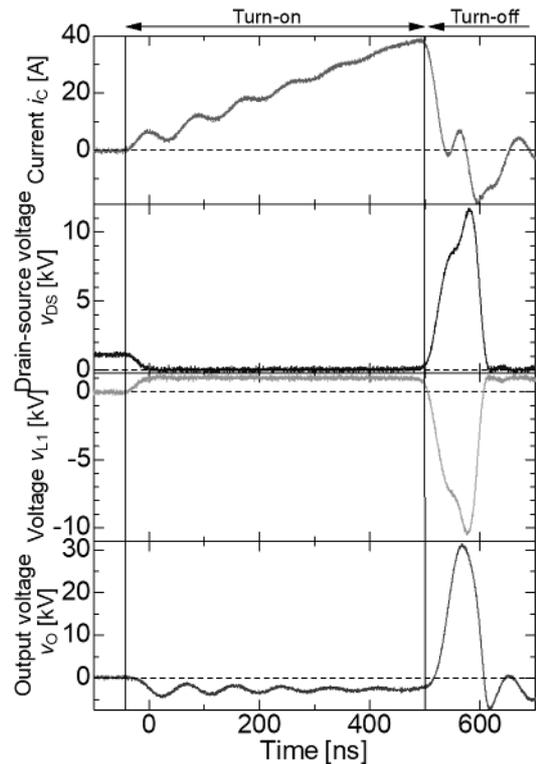


図 3 各部の電圧電流波形

ネルギーが小さく、重負荷では、充電期間のエネルギー消費が大きく、電流遮断後の消費エネルギーが小さくなっているためである。

3. まとめ

高耐圧SiC-MOSFETを用いることによって、昇圧パルストランスを用いたとき、巻き線比を小さくすることにより2次側のインダクタンスを小さくできる利点があり、急峻なパルス電圧の発生が可能となる。また、小型にも関わらず安定してパルス幅が短い高電圧パルスが発生することができることから、種々の応用への展開が期待できる。

本研究の一部は、「令和元年度科学研究費助成事業（基盤研究S：19H05611）」のための支援事業の補助ならびに、つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)の事業で実施された。

[1] H. Kitai, Y. Hozumi, H. Shiomi, K. Fukuda, and M. Furumai, in Proceedings of 29th International Symposium Power Semiconductor Devices ICs, p. 343 (IEEE, 2017)

[2] K. Takahashi, R. Saito, T. Onodera, K. Takaki, H. Kitai, K. Sakamoto, Rev. Sci. Instrumen., Vol. 92, 064706 (2021)