

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：54502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06330

研究課題名(和文) 小型パルスパワー装置による大電力・短パルス広帯域マイクロ波の発生とその安定化

研究課題名(英文) Generation of High Power Ultra-wideband Microwave by a Compact Pulse Power Generator

研究代表者

橋本 好幸 (Hashimoto, Yoshiyuki)

神戸市立工業高等専門学校・電子工学科・教授

研究者番号：20270308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：スパークギャップに高電圧パルスを印加してインパルス放電を行い、電磁波の発生条件について研究を行った。その結果、電磁波の出力は、印加するパルス電圧の立ち上がり時間が短い(10ns以下)方が大きくなることがわかった。また、電磁波が発生する期間は、パルス電圧印加後の約100ns以下の時間であることがわかった。これらの結果より、スパークギャップ放電で効率良く電磁波を発生するためには、パルス電圧の立ち上がり時間が数ナノ秒以下、パルス幅が100ns以下で繰り返し周波数が高い電源が必要であると考察される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高電圧パルス放電で発生する超広帯域電磁波は、通常の半導体で発生する電磁波よりも出力が大きい。このため、無線通信、高分解能レーダー、生体の活性化など様々な応用が考えられる。よって、本研究では、高電圧パルス放電で高出力の電磁波を発生させる条件について研究を行った。その結果、高電圧パルス放電を用いた電磁波の発生では、立ち上がり時間の短いパルス電圧が必要であることがわかった。また、電磁波の発生時間はパルス電圧印加後の約数十ナノ秒以下のごく短時間であることもわかった。

研究成果の概要(英文)：We studied generation of high power electromagnetic microwave by a compact pulse power generator. As a result, it was found that the shorter the rising time (<10nsec) of the applied pulse voltage, the larger the electromagnetic wave output. The generation of electromagnetic waves was less than 100 nsec after the pulse voltage was applied. From these results, it is considered that a pulse generator with a pulse rise time less than several nanoseconds, a pulse width less than 100 nsec, and a high frequency repeatedly is required in order to efficiently generate electromagnetic waves by spark gap discharge.

研究分野：パルスパワー工学

キーワード：広帯域マイクロ波 パルスパワー装置 PFN インパルス放電 電磁波

1. 研究開始当初の背景

近年、無線通信や高分解能レーダーの分野でインパルス超広帯域 (UWB) 電磁波が注目されている。インパルス UWB 電磁波は、物質の貫通力に優れていると同時に、パルス幅がナノ秒オーダーと狭いため分解能が高い。そのため、高速通信、高分解能地中探査レーザーや車載レーダーなど様々な分野へ応用、あるいは応用が期待されている。さらに、植物に適度な電氣的刺激を与えることで細胞が活性化することがわかっており、その電氣刺激を与える方法の一つとして UWB 電磁波の利用が期待される。

しかし、現在、UWB 電磁波は半導体を用いて発生させる低電力なものが一般的であり、空中線電力が低く地中探査レーダーとして用いた場合、数メートル程度の深さまでしか探査できない。また、生体への電氣刺激に用いることもできない。

そこで、本研究ではパルスパワー装置を用いた大電力超広帯域 (UWB) 電磁波の発生に注目した。パルスパワー装置は、電氣エネルギーを極めて短い時間の間に放出させ、瞬間的に極めて高いパルス電力を発生することができる。そのため、パルスパワー装置で発生する UWB 電磁波の電力密度は、従来の半導体で発生させる UWB 波と比較して桁違いに大きくなるのが期待される。なお、パルスパワー装置を用いた UWB 電磁波の発生に関する研究は、従来から米国を中心に行われており、日本では、同分野の研究は少ない。よって、本研究では、パルスパワー装置を用いて発生するインパルス UWB 電磁波の発振条件を明らかにするとともに、その発生の安定性についての検討を行うこととした。

2. 研究の目的

本研究は、小型同軸パルスパワー装置を用いたインパルス放電によって、超広帯域 (UWB) 電磁波の発生実験を行い、以下の項目について検討することを目的とする。

- (1) 既存の同軸パルスパワー装置の真空用の出力インタフェースを、大気中で動作可能なように改造を行い、その動作特性を明らかにする。
- (2) パルス電源を用いて UWB 電磁波の発生実験を行い、その発振条件を明らかにする。
- (3) UWB 電磁波の植物の電氣刺激に応用することを想定し、その先行実験として、マグネトロンで発生したパルス電磁波を植物に照射し、その影響を観察する。

3. 研究の方法

(1) 小型同軸パルスパワー装置の動作解析

電源には、同軸構造を有する小型のパルスパワー装置 (-240kV, 50nsec, 16Ω) を用いる。本装置は、これまで真空中で電子ビームを発生させる電源として使用してきた。本研究では、この装置の一部を改造して大気圧下で動作させることにした。パルス放電による電磁波の生成では、立ち上がりの早いパルスが必要であると言われている。しかし、パルスパワー装置の出力特性は、負荷インピーダンスによって変化する。そこで、負荷インピーダンスによって、小型同軸パルスパワー装置の出力特性がどのように変化するかをシミュレーション計算により評価することにした。図 1 に本実験で使用する (a) 小型同軸パルスパワー装置の外観と (b) シミュレーション計算で用いた等価回路を示す。ここで、 C_c, R_c, L_c, C_s は、それぞれコンデンサユニット 1 段あたりの容量、抵抗、インダクタンス、浮遊容量、また、 C_g, R_g, L_g は、それぞれギャップスイッチ間の容量、抵抗、インダクタンスである。 L_o, R_o は負荷 (放電電極) の負荷抵抗と負荷インダクタンスである。この等価回路を SPICE 電氣回路シミュレータで解析することで、小型同軸パルスパワー装置の動作解析を行った。

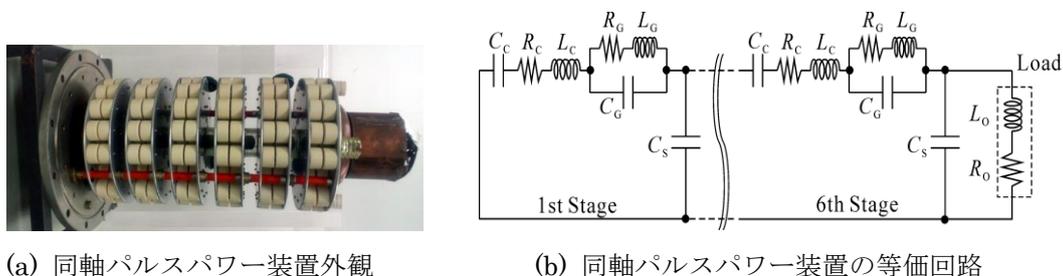


図 1 小型同軸パルスパワー装置の外観と計算で使用した等価回路

(2) インパルス超広帯域 (UWB) 電磁波の発生実験

図 2 に示す回路を用いて、小型同軸パルスパワー装置を電源としてインパルス放電を行い、UWB 電磁波の発生実験を行った。当初は、小型同軸パルスパワー装置のみで UWB 電磁波の発生実験を行う予定であったが、内部コンデンサの経年劣化や動作環境を真空から大気圧に変更したこともあり、同パルスパワー装置の動作が不安定となった。また、同装置のシミュレーション計

算による動作解析の結果から、現在の出力インタフェースでは、立ち上がり時間の短いパルスを得ることが難しいことがわかった。そこで、まずは、UWB 電磁波の発振条件等を探るために、出力パラメータの変更が可能なパルス形成線路 (PFN) を新たに設計・製作し実験で使用することにした。パルス電源で生成した高電圧パルスは、スパークギャップに接続し、インパルス放電によって電磁波を発生させる。スパークギャップに印加される電圧は、抵抗分圧器で分圧してオシロスコープでその出力波形を観察する。また、発生した電磁波は導波管へと導かれ、導波管の終端付近に取り付けられた短針プローブで発生した電磁波の一部を取り出し、その信号をオシロスコープで観察した。導波管の長さは 80cm でアルミ製の円形導波管 (直径 106mm) と矩形導波管 (WRJ-2) の 2 種を準備した。導波管の終端は、マイクロ波吸収体を全面に取り付けたシールドボックスを取り付けた。以上の実験装置を用いて、充電電圧などのパラメータを変化させ、電磁波の発生実験を行った。

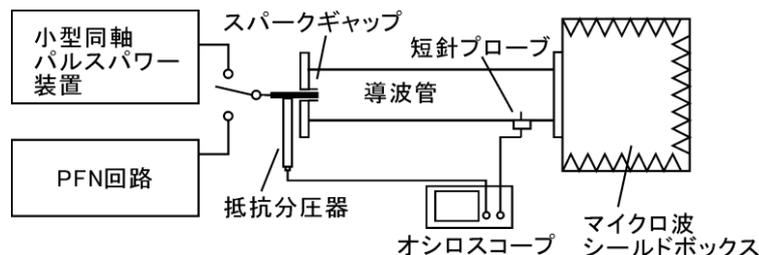


図 2 UWB 電磁波発生実験の概略図

(3) パルス電磁波の植物への照射実験

上記の実験において UWB 電磁波の発生が確認された場合は、その応用実験として、UWB 電磁波を植物に照射し、その影響を観察するとともに、現状のマグネトロンを用いて発生したマイクロ波の結果と比較検討することを計画した。そこで、まず先行実験として、パルスマグネトロン (発振周波数 9.4GHz、最大電力 40kW、パルス幅 $1\mu s$) で発生したマイクロ波を小松菜種子に照射し、その発芽に与える影響を観察することとした。図 3 にマイクロ波照射実験の実験装置の概略図を示す。まず、パルスマグネトロンで発生させたマイクロ波を矩形導波管 (WRJ-10) 中央に置いた小松菜種子に照射する。マイクロ波を照射した種子は、ポリスチレン容器の底に水に浸した紙を敷き、その上に格子状に並べ、 $8^{\circ}C$ に設定されたクールインキュベータ内で育成する。その後、1 日ごとに発芽した種子の個数を観察し、その発芽率を評価する。なお、発芽の観察日数は 2 週間とした。本実験では、発芽適温 $20\sim 25^{\circ}C$ 、発芽率 85% 以上である小松菜種子を用いた。

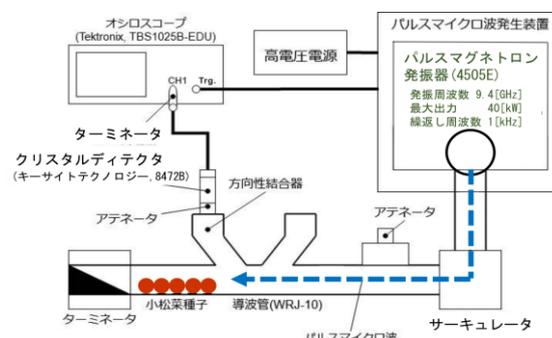


図 3 マイクロ波照射実験の実験装置の概略

4. 研究成果

(1) 小型同軸パルスパワー装置の動作解析結果

図 1 に示す等価回路を用いて、負荷抵抗 (放電抵抗) を変化させた場合の小型同軸パルスパワー装置の出力特性を SPICE 電気回路シミュレータで解析した。図 4 に、充電電圧を 40[kV] として負荷抵抗を変化させた場合の (a) パルスパワー装置の出力の最大値、(b) 出力パルスの立ち上がり時間および (c) 出力電流の変化を示す。この計算では、 $R_G=100$ [m Ω], $L_G=10$ [nH], $C_G=40$ [pF], また、 $C_C=16.9$ [nF], $R_C=100$ [m Ω], $L_C=30$ [nH], $C_S=40$ [pF] と仮定した。図 4 の結果より、負荷抵抗が大きくなるにつれて、出力電圧が上昇するとともに出力電流は小さくなることがわかる。パルスの立ち上がり時間は、パルスパワー装置の出力抵抗 $R_0=16$ [Ω] を境に変化し、それよりも負荷抵抗が小さい領域では約 28 [ns] と極めて遅い。ここで、これまでの他の研究結果より、インパルス放電による電磁波の発生には、パルス電圧の立ち上がり時間と電流値が関係していることが報告されている。よって、本研究で使用する小型同軸パルスパワー装置で電磁波を効率良く発生させるためには、負荷抵抗が小さい場合でも、パルス電圧の立ち上がり時間を早くするための工夫が必要となることがわかった。

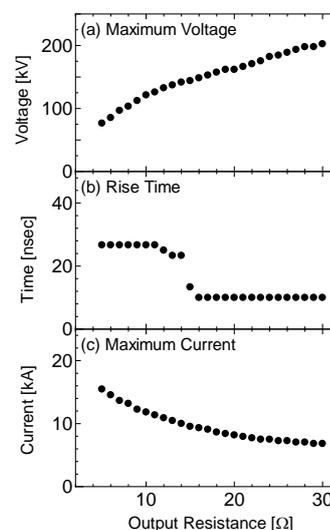


図 4 負荷抵抗を変化させた場合のパルスパワー装置の出力特性 (充電電圧 40kV の場合)

(2) インパルス超広帯域(UWB)電磁波の発生実験の結果

前述の通り小型同軸マルクス装置の出力が安定しないことと、同装置の動作解析結果より、パルス電圧の立ち上がり時間が大きいことがわかったため、まずは、PFN回路を用いて電磁波の発生実験を行うことにした。図2に示す回路を用いて、電磁波の発生実験を行った結果を図5に示す。実験ではパルス幅の設計値が497[ns](PFN-1)と65[ns](PFN-2)の2種のPFNを使用した。図5(a)は、PFN-2を用いて、PFNの充電電圧を5~20[kV]まで変化させた場合のスパークギャップに印加されるパルス電源の立ち上がり時間と短針プローブに50[Ω]の検出抵抗を接続して測定した電磁波の最大電圧を示す。図5(a)より、電磁波の検出電圧は、印加電圧の立ち上がり時間が短くなるにしたがって大きくなることわかる。特に、電圧の立ち上がり時間が10[ns]以下の領域で電磁波の検出電圧は著しく大きくなる。また、同図より、充電電圧が高い方が、相対的に電磁波の検出電圧が大きくなることわかる。これは充電電圧が大きい方がスパークギャップの瞬時的な放電電流が大きくなるためであると考えられる。次に、図5(b)は、充電電圧を20[kV]としてパルス幅の異なるPFNを用いて電磁波発生実験を行った場合のスパークギャップ印加電圧の立ち上がり時間と電磁波の検出信号の最大電圧を測定した結果である。同図より、出力パルス幅の異なるPFN-1およびPFN-2のどちらを使用した場合も、電磁波の検出電圧は印加電圧の立ち上がり時間にのみ依存していることがわかる。電磁波の検出信号をオシロスコープで観察した結果より、PFN-1の場合もPFN-2の場合も、電磁波はスパークギャップにパルス電圧を印加した後の約100[ns]以下の領域でのみ発生しており、それ以降での電磁波の発生はなかった。以上の結果より、放電によって発生する電磁波の出力を大きくするためには、ナノ秒以下の立ち上がり時間を有するパルス電圧、および大きな放電電流が必要であると考察される。パルス電源でパルスの立ち上がり時間を短くするためには、電源の出力インピーダンスとスパークギャップのインピーダンス整合が必須となる。また、放電電流を大きくするためには、パルス電源の出力インピーダンスおよびスパークギャップのインピーダンスを極力小さくすることが必要となる。さらに、電磁波の発生効率を高めるには、電源のパルス幅を100[ns]以下として、繰り返し周波数を高くすることが必要であると考察される。

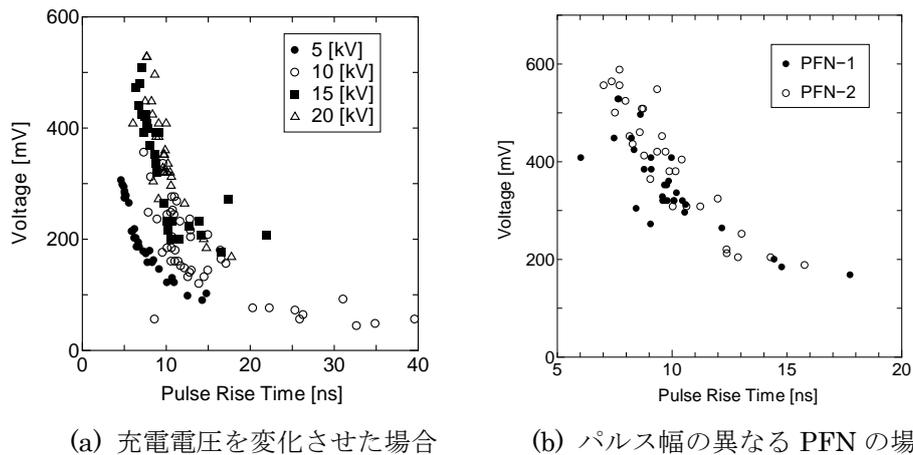


図5 PFN電源を用いた場合の電磁波発生実験の結果

(3) パルス電磁波の植物への照射実験の結果

図6に小松菜の種子にマイクロ波(9.4 GHz, 20kW, 1 μs, 1kHz)を10秒間および100秒間照射した種子の発芽率と、マイクロ波未照射種子の発芽率を比較した結果を図6に示す。同図より、未照射およびマイクロ波を100秒間照射した種子の14日経過後の発芽率は、ほぼ等しく18%前後であることがわかる。これに対してマイクロ波を10秒間照射した種子の14日後の発芽率は約33%であり、マイクロ波未照射種子の約1.8倍となった。この結果より、小松菜種子に特定なパルス幅を持つマイクロ波を照射することで、低温下における発芽特性を改善できることがわかった。よって、小型パルスパワー装置でインパルスUWB電磁波の発生が可能になった場合は、そのUWBを植物に照射することで、より広い領域で発芽特性等の改善につながることを期待される。

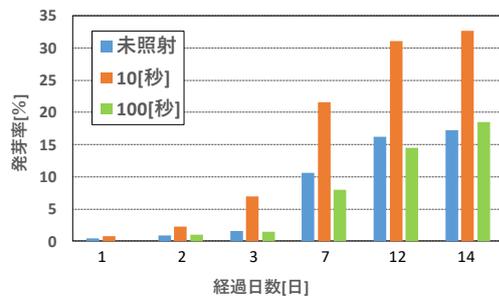


図6 マイクロ波照射時間と発芽率の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 橋本好幸, 藤原圭吾
2. 発表標題 パルス電磁波照射が種子の発芽に与える影響
3. 学会等名 第25回高専シンポジウム in Kurume
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiyuki HASHIMOTO
2. 発表標題 Output Characteristics of Coaxial Marx Generator for Ultra-wideband Microwave Generation
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyuki Hashimoto
2. 発表標題 Development of Coaxial Marx Generator for High Power Ultra-Wideband Microwave Generation
3. 学会等名 ADVANCES IN APPLIED PLASMA SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------