

K-39

## 電子ビームの大電流化を目的とした PFN 回路を用いたホローカソード放電の形成 Formation of Hollow Cathode Discharge Using PFN Circuit for High Current Electron Beam

○長瀬敦<sup>1</sup>, 中村輝<sup>2</sup>, 渡部政行<sup>3</sup>, 田辺光昭<sup>4</sup>\*Atsushi Nagase<sup>1</sup>, Hikaru Nakamura<sup>1</sup>, Masayuki Watanabe<sup>3</sup>, Mitsuaki Tanabe<sup>4</sup>

Abstract: General electron beam sources use thermionic emission as the electron source. Since thermions are generated by heated metals, the part of metal is severely damaged by heat, and durability becomes low. To solve thermal problems of such electron sources, the purpose of this research is to develop an electron beam source by using electrons in the plasma as a source. In our electron beam device, the hollow cathode discharge is applied to the electron source of the electron beam. Hollow cathode discharge can produce a high density plasma. In this experiment, the discharge is formed by a PFN circuit for the extension of the plasma discharge time. By using a 5-stage PFN circuit, it was confirmed that the discharge time was about 5 times longer than that of a single stage circuit.

### 1. 研究背景および目的

荷電粒子ビームとは、生成した電子やイオン等の荷電粒子を電場や磁場を用いて加速・収束し、それらの軌道を任意に制限できるようにビーム状にしたものである。荷電粒子は比較的容易に生成できる粒子であり、質量が小さく、微小であるため高速で制御性もよい。以上の理由から、電子ビームやイオンビーム等の荷電粒子ビームは、様々な研究や医療・工学分野で応用されてきた。現代では電子顕微鏡や半導体、加速器など物質の加工や測定技術などさまざまな研究分野に利用されている<sup>[1]</sup>。

本研究室ではプラズマ放電中の電子を利用した電子ビーム源の研究を行っている。電子ビームは電子を生成し、生成された電子を任意の軌道に制御する装置である。電子の生成において、これまでの一般的な電子ビーム源では、フィラメントなどの金属を加熱することにより電子が放出される熱電子放出を利用して電子の供給源としてきた<sup>[2]</sup>。しかし、金属加熱による熱電子放出では大量の電子を発生することは難しく、さらに金属過熱により金属を破損してしまうことから定期的な金属交換などのメンテナンスが必要となる。そこで、プラズマ放電中の電子を電子ビーム供給源とすることで耐久性が高く、大電流化の可能な電子ビーム源の実現を目指している。特に本研究ではホローカソードの放電に Pulse Forming Network (PFN) 回路のパルス放電を用いることで多量の電子を生成し、それを電子ビーム源として利用する研究を行っている。

### 2. ホローカソード放電

Figure 1 にホローカソード放電の概略図を示す。ホローカソード放電とは通常のグロー放電のカソードに

おいて中空円筒状の電極を用いることにより通常より多くの電子を生成する放電である。通常のグロー放電は2枚の平行平板電極間に1~100Pa程度の気体を充満させ、電極間に印加する電圧を増加していくと、気体が電離し、電流が流れる現象である。これは電極間に存在するイオンがカソードに衝突することにより電極表面から電子が飛び出る $\gamma$ 作用とカソードから飛び出た電子が気体分子に衝突することで気体分子を電離させる $\alpha$ 作用が連鎖的に起こることで放電の形態を維持している。ホローカソードを放電に用いることで広い陰極表面における $\gamma$ 作用により生成された電子がホローカソード内を往復運動しそれが気体分子に衝突することで平行平板電極を使う放電と比べ、より多くの電子を生成することができる。

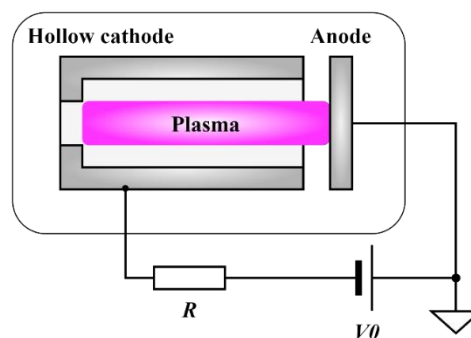


Figure 1. Schematic drawing of hollow cathode discharge

### 3. PFN 回路

PFN 回路の回路図を Figure 2 に示す。PFN 回路とは通常のパルスの電圧を印加し、大電流を形成する際に用いられるコンデンサーの放電において、充電されたコンデンサーとコイルを電圧を印加する対象に対し、複数個並列に多段に接続することで通常過渡的な応答

になるコンデンサーの放電の時間応答の幅を長くして、放電波形を矩形波に近づけるものである<sup>[3]</sup>。本実験においては電気容量16 $\mu$ Fのコンデンサー、インダクタンス1.7 $\mu$ Hのコイルを5個並列に接続し、放電実験を行った。回路の特性インピーダンス $\sqrt{L/C}$ と等しい0.33 $\Omega$ の抵抗を用いてシミュレーションを行った結果を Figure 3 に示す。シミュレーションには LTspice XVII を使用した。PFN 回路を用いた回路においてパルス幅 $\tau$ は $\tau = 2n\sqrt{LC}$ となる。コンデンサーが1個の場合 ( $n=1$ ) に比べ、5段の PFN 回路 ( $n=5$ ) では放電波形が約5倍、伸びていることが確認できる。

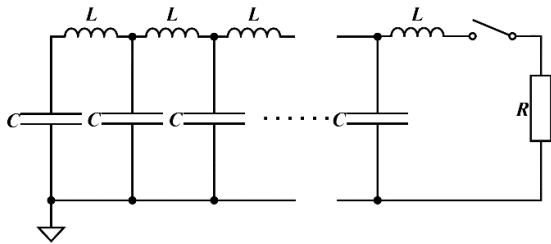


Figure 2. Schematic drawing of PFN circuit

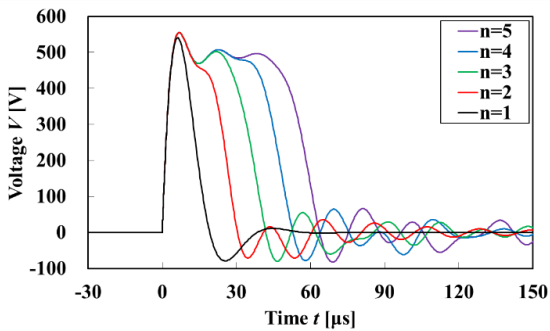


Figure 3. Simulation results of PFN circuit

#### 4. 実験装置および結果

放電実験では、ホローカソード-アノード間に電圧を印加した状態でホローカソード内に気体を流入させ、パルス放電を形成させる。実験装置の概略図と回路図を Figure 4 に示す。コンデンサーに充電する電圧を100Vから1,000Vまで、100Vずつ増加させたところ、充電電圧が500Vで放電が発生した。またパルス放電が形成された様子を測定することができた。ホローカソード-アノード間の電圧と電極間に流れた放電電流の時間応答を Figure 5 に示す。放電実験の結果よりホローカソード-アノード間で放電を形成した場合でもシミュレーションの結果とほぼ同じ時間幅の放電波形を確認することができた。しかし、電圧や電流の最大値や収束値などがシミュレーションと異なる結果になった。これは気体が放電しプラズマが形成されて

いるが、プラズマの抵抗成分やインダクタンス成分が一定ではなく、時間とともに変化するためであると考えられる。

ホローカソード-アノード間の PFN 回路を用いての放電は確認できたので、この PFN 回路を用いた放電で生成した電子を電子ビームとして制御できるのかを検討する実験を進めていく。その結果および検討については講演会にて発表する。

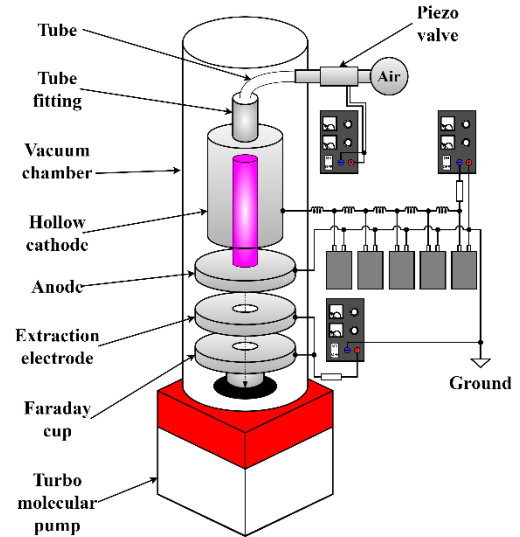


Figure 4. Schematic drawing of experimental equipment circuit for an electron beam source

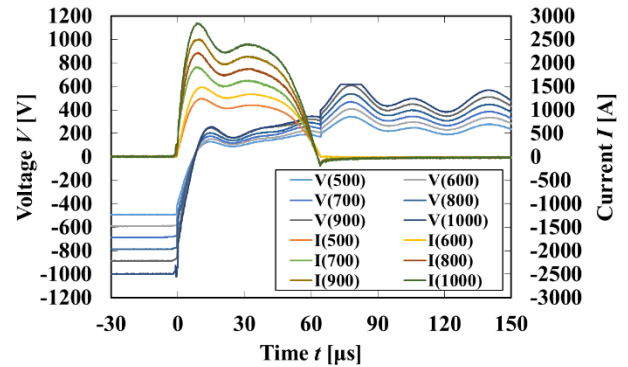


Figure 5. Time response of discharge voltage and current of the hollow cathode discharge using PFN circuit

#### 5. 参考文献

- [1] 石川順三: 荷電粒子ビーム工学, コロナ社, 2001, pp.1-8, 237-268
- [2] Koichi Saeki: "Hot cathode discharge plasmas", J. Plasma Fusion Res, Vol.79, No.12, pp1242-1248, 2003
- [3] 高木浩一, 他: 「パルスパワー発生回路の設計と実践」, J. Plasma Fusion Res, Vol87, No.3, pp202-215, 2011
- [4] Sofia del Pozo et.al: "A Novel RF Excited Plasma Cathode Electron Beam Gun Design", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.61, No.6, pp1890-1894, 2014