

論文審査の結果の要旨

氏名：中 村 耀

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：ホローカソード放電を利用した電子ビーム源の開発に関する研究

審査委員：（主査） 教授 渡部 政行

（副査） 教授 早川 恭史

国立研究開発法人産業技術総合研究所 榊田 創

本論文では、プラズマ放電を電子供給源に応用した電子ビーム源の開発に関して報告されている。電子ビーム源とは、何らかの方法で電子を生成し、電界や磁界を用いてビーム状の電子の流れを形成する装置の総称である。ここで電子ビーム源を機能的に分類すると、電子を生成する「電子供給源」と電子を加速する「電子加速部」に分けることができる。本論文では、主にプラズマ放電を応用した電子供給源の開発に関する研究結果が報告されている。これまで運用されている一般的な電子ビーム源の電子供給源としては「電界放出型」「ショットキー型」「熱電子放出型」が用いられている。電界放出型の特長は、尖った金属に高電圧を印加することで金属先端から電子を放出する方式である。また熱電子放出型は、高温状態の金属から放出される熱電子を電子供給源に利用している。両方式の中間的な特性を有するショットキー型を含め、すべて高真空領域における電子ビームの運用が望ましく、中真空領域以下では、イオン衝撃や電子供給部材の腐食などに起因した電子ビームの性能低下が問題とされている。本研究では、電子供給源にプラズマ放電を応用することで、中真空領域でも運用可能な電子ビーム源の開発に関して報告されている。

本論文は、第1章の緒言から第5章の結論までの全5章で構成されている。論文中の第2章が論文全体に関する理論に関して、また第3章および第4章がプラズマ放電を利用した電子ビーム源の実験に関する結果と考察に関して報告されている。第5章の結論の後に参考文献、業績等が付け加えられている。

第1章では、本研究の背景として一般的な電子ビーム源の原理や特性について記述されている。一般的な電子ビーム源で用いられている「電界放出型」「熱電子放出型」の利点や問題点を述べている。続いて、電子加速領域の真空度を「低真空（1 Pa 以下）」「中真空（1～10⁻⁴ Pa）」「高真空（10⁻⁴～10⁻⁷ Pa）」「超高真空（10⁻⁷ Pa 以上）」に分類し、それぞれの真空領域における電子ビーム源の特性を説明している。第1章の最後には、プラズマ放電を電子ビームに応用した場合の利点やその実現に対する問題点を述べ、それらを踏まえて本研究の目的が記述されている。

第2章では、電子ビームの形成およびプラズマの生成に関する理論等が述べられている。まず真空度と電子が衝突なしで進むことのできる距離の関係（平均自由行程）に関して説明している。次に空間電荷制限や電子ビームの発散など、電子ビームの特長や性質について説明されている。次に、電子供給源に応用するプラズマ放電の放電機構や特性に関して記載されている。最後に、本研究で応用するホローカソード放電に関して詳しく説明されている。

第3章では、ホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の実験に関して報告されている。まず電極間電圧と放電電流の関係から、ホローカソード放電で形成されている放電のモードがグローモードであることが示されている。この結果から、電極部が高温状態となる熱陰極のアーク放電のモードにはなっておらず、そのため電極の損傷が少ないことがわかる。電極損傷は電子ビーム源の寿命に直結することである。また静電プローブの一種であるトリプルプローブを用いたホロー陰極内のプラズマ特性に関する計測結果に関して本章で報告されている。ホローカソード内の電子温度および電子密度の空間分布の計測結果から、ホローカソード電極内すべての空間にプラズマが分布していることが示されている。一般的にホローカソードプラズマは γ 作用と α 作用の高揚により高密度プラズマが形成可能であることが知られている。ホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源では、このプラズマ中の大量の電子を引き出し、電子ビームを形成できると期待できる。本章では、ホローカ

ソードプラズマを利用した電子供給源から電子ビームを引き出す実験結果に関しても報告されている。電子ビームの特長である引き出し電圧の印加に伴う急激な電子ビーム電流の増加およびその電流値の飽和が観測されている。しかしながら、空間電荷効果から見積もられた電子ビーム電流の理論的な制限値よりかなり高い値となっていることも示されている。この原因として電子供給源と電子加速部の間のメッシュ状グリッド電極では圧力差を形成できず、そのため電子加速部の真空度が数十 Pa と高い状態となり、電子ビームがそのガスを電離したためだと結論づけられている。この電子ビームの運用モードは探査衛星「はやぶさ」に搭載されたイオンエンジンの中和器で利用されている「ブルームモード」であることも示されている。

第4章では、第3章で報告したホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の発展として、マイクロホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の実験に関して報告されている。マイクロホローカソード放電とは第3章で示されたホローカソード放電の一種であり、マイクロメータサイズのホローカソード電極を利用して形成するプラズマ放電である。マイクロホローカソードプラズマもホローカソードプラズマと同様に高密度プラズマの形成が可能である。本研究ではこのマイクロカソードプラズマを、電子供給源と電子加速部の間の圧力差を形成できるプラズマウインドウの機能を備えつつ、そのプラズマから直接、電子ビームを引き出す新しい発想に基づいた研究であり、その原理・検証が本章で報告されている。論文ではまず、マイクロホローカソードプラズマの放電特性に関して報告されている。電極間電圧と放電電流の関係から、マイクロホローカソード放電もホローカソード放電と同様に電極の損傷が少ないグロー状の放電が形成されていることが示されている。続いて、プラズマウインドウの性能に関してその理論的な機構と実験結果が報告されている。実験の結果、電子供給部と電子加速部の圧力差として 10000 以上の値が達成できたことが報告されている。この圧力差によりプラズマ放電を電子供給源に応用しつつ、電子加速部の気圧を中真空領域まで下げることが達成できたことが高く評価できる。続いて、マイクロホローカソードプラズマを利用した電子供給源から電子ビームを引き出した結果に関しても報告されている。第3章と同様に、電子ビームの特長である引き出し電圧の印加に伴う急激な電子ビーム電流の増加および飽和領域の観測が報告されている。しかしながらまだ空間電荷効果から見積もられる電子ビーム電流の理論的な制限値より高い値となっていることも報告されている。この原因として、電子供給源と電子加速部に大きな圧力差を形成することができたものの、中真空の領域では電子の加速部に残留ガスも多く存在し、その結果、電子ビームがブルームモードとなったと結論づけられている。

第5章では、申請者が行った研究成果のまとめと、今後の研究の展望について述べられている。

申請者の研究は、従来の方法では実現できなかった中真空領域におけるプラズマ放電を利用した電子ビーム源を実現するための方法を提案し、その原理・検証を行った点で高く評価できる。マイクロホローカソード放電に用いた電極の孔径を更に小さくすることで、中真空領域だけでなく高真空領域におけるプラズマ放電を用いた電子ビーム源の実現も十分考えられることから、今後の電子ビーム源を応用した様々な分野の発展に貢献できることが高く評価できる。また、本論文で提案したマイクロホローカソードをプラズマウインドウに応用するアイデアは、プラズマウインドウ研究の分野に関しても新規性が高く、電子ビーム源以外の応用も十分に考えられる点も高く評価することができる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

令和4年2月17日