

博士学位論文審査要旨

2010年2月17日

論文題目： 熱陰極を用いたイオン源プラズマに関する研究

学位申請者： 宮本 直樹

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 和田 元

副 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 大鉢 忠

副 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 粕谷 俊郎

要 旨：

高エネルギー粒子加速実験のために利用されてきたイオン源は、最近になって半導体プロセスや表面処理などに利用され、核融合発電の実現可能性を探るためのプラズマ加熱装置としても有望視されている。本論文は高性能のイオン源を実現するため、イオン源プラズマを生成・維持する上で最も信頼性の高い熱陰極放電の基礎と応用に関わる研究成果をまとめたものである。

第1章序論で研究の背景、第2章で熱陰極放電型イオン源のプラズマ生成原理についてまとめた後、高エネルギー粒子入射用イオン源に対する熱陰極放電最適化実験の結果を3章と4章で報告している。3章では水素放電から高プロトン比のイオンビームを引き出すため、熱陰極と磁気フィルター構造を組み合わせたプラズマ生成法を提案した。実証実験を行った結果、単純な放電構造に対するプロトン比40%未満と比較して、2倍以上の80%のプロトン比を実現し、提案構造の優位性を確認している。4章では核融合実験に用いられる1.2 m規模の大型のイオン源に対して、熱陰極の分散配置と電源系を改善することにより、引き出されるイオンビームの空間分布を一様なものとしている。また、高電力密度放電時の安定性を調査するため、縮小モデルのイオン源を用いて熱陰極構造を最適化する実験を行い、熱陰極の配置を適正化することによりアーク効率が飛躍的に改善されることを実証した。

第5章では半導体イオン注入機に用いられるイオン源の熱陰極性能、および寿命につ

いて調査した結果を報告している。既存装置の実験結果にもとづいて新たな電極構造を提案し、実験によって放電効率と寿命が改善されることを実証している。6章では5章の結果を見直し、さらなる効率改善と寿命延長を実現する熱陰極構造として、同軸型加熱電流路を有する陰極構造を提案し、性能評価実験を行った結果を報告している。初期実験の結果より、同軸構造には原理的に温度分布が高くなる領域が存在することを見出し、集中的な加熱を防止するための構造を考案し、実証試験を行った。改善後の寿命は、同一運転条件下でも改造前熱陰極の2倍程度あり、イオン生成効率が改造前の単純フィラメント構造の熱陰極に比べて4倍から14倍と格段に改善されていることから、同一イオン電流量で寿命比較を行う場合にはさらに大きな寿命延長効果が期待されることを示した。

7章では6章で提案した同軸構造が、原理的に熱陰極表面とプラズマの境界面で生じる振動を除去する可能性があることを述べ、この検証実験を行った結果について報告している。実際に、磁場構造を適正なものとするにより、ビームに発生する振動を改善できることを実証した。

8章においては7章までの各章の結果をまとめ、プラズマに投入する電力密度が熱陰極の放電効率を決める重要な因子であり、熱陰極構造の最適化により、さらにイオン源プラズマの運転領域を拡大可能であるという結論を導き出している。

以上より、本論文は今後の熱陰極にもとづくイオン源プラズマ装置の最適化指針を明確に示しており、放電の不安定化要因や熱陰極損傷の生じる原因などについても数多くの知見を提示している。さらに本研究によって得られた一部のイオンビーム電流密度や運転時間は、世界的に見て最高水準にある。よって本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

総合試験結果の要旨

2010年2月17日

論文題目： 熱陰極を用いたイオン源プラズマに関する研究

学位申請者： 宮本 直樹

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 和田 元

副 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 大鉢 忠

副 査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 粕谷 俊郎

要 旨：

本論文の提出者は2008年4月より社会人学生として本学大学院工学研究科電気電子工学専攻に進学し、研究を開始した。各年度において優れた研究成果を挙げ、英語の語学試験に合格し、ドイツ語についても十分な能力を有すると認定されている。本論文の主たる内容は、米国物理学会国際会議 Proceedings 1件、Journal of Plasma Physics and Nuclear Fusion Series 誌 2件、Review of Scientific Instruments 誌 2件に査読論文として掲載され、すでに十分な評価を得ている。

本年1月30日午後2時半より約3時間に亘り、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれた。論文概要講演の後、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。以上により、本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることを確認した。

よって総合試験の結果は合格であると判定した。

博士學位論文要旨

論文題目： 熱陰極を用いたイオン源プラズマに関する研究

氏名： 宮本 直樹

要旨：

本論文は熱陰極を用いた磁化プラズマ型イオン源に関わる基礎物理とその応用に関する研究についてまとめたものである。論文は8章で構成されており、1章の序論で熱陰極を用いるイオン源技術の歴史的発展を概説したのち、これらのイオン源に要求されている項目について述べ、本研究の目的について論じている。

2章では、熱陰極によるプラズマ生成の原理、および本研究で扱ったバケット型イオン源、セシウム添加体積生成水素負イオン源、バーナスイオン源の放電機構等、論文中の議論を展開する上で必要となる基礎原理について整理した。

3章では、中性子工学研究用直線加速器に用いる高プロトン比イオン源の設計と、その設計に基づいて製作したイオン源でのプラズマ生成、さらには引き出された水素イオンビームの諸特性、特にプラズマ生成室の磁気フィルタによるプロトン比制御の結果について報告している。ここでプラズマ電極近傍の磁気フィルタ配位を変化させることによって引き出される水素イオンビーム中のプロトン比を制御できることを明らかにした。その結果、設計仕様よりも高い80%のプロトン比の水素ビームの生成が可能となった。また水素イオンビーム電流130 mA、プロトンビーム電流101 mAの収束性の良いイオンビームが想定値の60%の放電電力で実現され、設計値を超えた性能が得られた。さらに磁気フィルタを用いることによりイオン生成を高効率化することによって熱陰極に対する負荷を低減し、熱陰極の長寿命化を実現できた。

4章では、核融合プラズマ加熱に用いる中性粒子入射加熱装置用セシウム添加体積生成負イオン源に適用されているバケットイオン源について論じている。大面積大電流負イオン源のプラズマ分布の不均一の原因が、大型のプラズマ生成室に分布して配置されている熱陰極の局所的な放電電力の不均一であることを明らかにし、放電抵抗の調整により大面積プラズマを均一化できることについて述べた。均一な大面積プラズマ生成後、ビーム引き出し面積を1/5に制限した初期実験で、添加したセシウムによって負イオン電流が約2倍となる効果を確認した。さらに要求されている運転ガス圧0.2 Paにおいても安定な負イオンビームの生成が可能となった。

ITER concept source (ITER 概念設計イオン源) の開発においては、熱陰極を用いた安定でかつ高密度なプラズマ生成にはカソード-アノード面積比だけではなく、カソードから放出される電子分布を最適化する必要があることを明らかにした。これによって投入可能となった大電力プラズマ生成によって、放電電力4.7 kWに対し水素負イオン電流2.1 A (電流密度30 mA/cm²) が得られることを確認した。この結果は重水素換算で電流密度20 mA/cm²であり、国際熱核融合実験炉用中性粒子入射加熱装置 (ITER-NBI) の要求仕様を世界ではじめて実現した。また、

簡便な構造のプラズマ電極を用いた水素負イオン源によって、セシウム効果に対する最適な電極温度を明らかにし、ITER-NBI の要求寿命の半分である 140 時間定常運転を実証した。以上により、セシウム効果最適化による負イオン生成の高効率化によって、ITER-NBI 要求寿命の熱陰極寿命が充分実現できることを示した。

5 章では、半導体製造に使われているイオン注入装置について概説した後、イオン注入装置に用いられるバーナスイオン源のイオンビーム生成高効率化の一手法を提案した。アークチャンバ内に設置されているリフレクタの電位を、生成されたプラズマの電位よりも充分大きな負電位にすることによって、生成されるイオンビーム電流を増加できることを明らかにした。このアークチャンバ内電位構造最適化とアークチャンバサイズの大型化によって、同一放電電力で約 2 倍のイオンビームが生成できることを明らかにした。このイオンビーム生成の高効率化によって、バーナスイオン源の熱陰極寿命を約 2 倍に向上できることを示した。

6 章では、5 章までに述べてきた高密度プラズマ生成に用いられる熱陰極の構造を見直し、加熱電流が陰極表面に大きな磁場を生成しない同軸構造の熱陰極を開発した。はじめにこの同軸熱陰極を用いた小型イオン源を開発し、磁場のない状態での高密度プラズマ生成が可能であることを示し、そのプラズマから 3 kV で $880 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の水素イオンビームが引き出せることを示した。さらに 5 章で述べたバーナスイオン源にこの同軸熱陰極を適用した場合、均一で高密度な磁化プラズマが生成されることを明らかにした。この同軸熱陰極によって生成されるプラズマの局所イオン密度は、それまでのヘアピンフィラメントの 10 倍程度となり、イオン生成効率は大幅に改善される。また、同軸熱陰極を適用したバーナスイオン源では、これまでのイオン源と比較して約 2 倍の 1 価イオンビーム、5 倍以上の 2 価及び 3 価イオンビームが得られた。この同軸熱陰極によるイオン生成効率向上によって、5 章で向上が認められたフィラメント寿命のさらに 2 倍の熱陰極寿命向上が可能であることを明らかにした。

7 章では、同じく磁場構造の違いによるプラズマ不安定性について、生成されたプラズマ中のイオン電流雑音と振動に着目して調査した。その結果、同軸カソードを用いるバーナスイオン源プラズマは、熱陰極の自己磁場による放電室内磁場構造の擾乱がないため、カソードの熱雑音以外に特異な振動が発生しないことを示した。また、ヘアピンフィラメントを用いるバーナスイオン源に発生するプラズマの振動は、陽光柱を磁場と直交する方向にイオン音波が横切るとするモデルにより説明される。さらにフィラメントを用いるバーナスイオン源から引き出されるイオンビームには、このイオン音波に起因する振動が反映しているのみならず、直交する引出電界とイオン源外部磁場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトに起因する振動が存在することを明らかにした。

8 章では、本研究で得られた知見について総括し、その後に熱陰極加熱電力と放電電力密度との相関を示した。さらに磁化プラズマ生成において、プラズマ生成部の磁場構造制御及び電界構造制御によって磁化プラズマの高密度化およびイオンビーム生成の高効率化が可能であることを示した。またこれらの高効率化によって、これまで短寿命とみなされてきた熱陰極であっても、高周波放電と遜色ない寿命が得られる見通しを示した。最後に本論文の結果を踏まえた磁化プラズマイオン源に関する今後の研究展望について論じた。