小型マイクロ波イオン源の特性試験

祐延 悟*・河内 幸二*

(受理1996年11月29日, 掲載決定1997年3月1日)

Characteristics of Compact Microwave Ion Source

Satoru SUKENOBU and Kouji KAWAUCHI

(Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corporation, 2-4, Suehiro, Tsurumi, Yokohama 230)

(Received December 29, 1996, Accepted March 1, 1997)

1. はじめに

表面分析あるいは試料の表面処理を行うためには、小型で各種ガスのイオン生成が可能で輝度が高く、しかもエネルギー分散の小さいイオン源が望まれる。マイクロ波放電を利用したイオン源は、無電極放電であるため活性なガスを用いても長寿命であることが期待されることから、いろいろな形式のイオン源の開発が進められている。これらのイオン源のなかで、永久磁石を用い、同軸ケーブルでマイクロ波を導入するタイプの小型イオン源がIshikawaらによって開発されており、高輝度のイオン源が得られている^{1,2)}。

今回、この小型イオン源を基にマイクロ波プラズマとビーム引出しプラズマとを分離したダブルプラズマ方式の小型マイクロ波イオン源を開発し、酸素イオンの引出し特性を測定するとともに、イオンビームのエネルギー分散の測定およびイオンの質量分析を行った。

2. イオン源及び計測系

Fig. 1に実験装置の概略を、Fig. 2にイオン源断面図の概略を示す。マイクロ波は、2.45 GHzのマイクロ波源から同軸ケーブルを介し、アイソレータ、パワーモニタ、スタブチューナを経由してイオン源へ供給される。イオン源は、放電室、アンテナ、陽極、引出し電極で構成される。陽極と引出し電極の間には0~10 kVの電圧を印加することができ、陽極に開けたアノードカップから

Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup.

イオンビームを引出す。また、放電室と陽極の間に0~70 Vの電圧を印加して、放電室内のプラズマからアノードカップへ電子を引出し、アノードカップ内に高密度のプラズマを生成する構成としている。放電室の内径は18 mm、放電室内容積は2.5 cm³、アノードカップの直径は、0.7 mmである。放電室、アンテナ、陽極は強磁性体で制作されており、放電室の外部にリング状のSm-Co磁石(外径57 mm、内径47 mm、高さ8 mm×2個)を配置し、放電室内に約0.1 Tの磁束密度を作るとともに放電室と陽極の間に磁束を集中させ、放電室内に生成したマイクロ波プラズマから電子を陽極に開けたアノードカップに導く役割を果たしている。アンテナは、N型コネクタの先端に針状の強磁性体を取付けることによって放電開始を容易にするるとともに高い磁場を放電室に開けた孔の近傍にできるようにしている。

イオン源へのマイクロ波の投入および反射電力は、あ

* 関東芝重電技術研究所 (〒230 横浜市長見区末広町 2-4)

Fig. 2 Cross sectional view of compact microwave ion source.

Fig. 3 The extracted ion current as a function of the ion-extraction voltage with variation of microwave input power.

らかじめ校正を行ったパワーモニターを用いて測定した。また、スタブチューナを調整してイオン源からの反射が無いよう調整してマイクロ波プラズマを放電室内に生成している。イオン源の動作ガスとしては、高純度酸素ガス（純度99.9%）を用いており、動作圧力はエネルギー分析器を配置した真空容器圧力で、約 3×10^{-3} Paである。このときのアノードカップのコンダクタンスから計算した放電容器内の圧力は、約24 Paである。

イオン源から引出したビームの全電流は、ファラデーカップを用いて測定した。ファラデーカップはイオン源から56 mm 離して設置し、その口径は26 mm である。イオンビームのエネルギー分散は、イオン源から約23 cm 離れた位置に127度偏向円筒型エネルギー分析器を用いて測定した。エネルギー分析器の偏向半径は40 mm、入出射スリットの直径は0.1 mm であり、エネルギー分解能 ($E/\Delta E$) は400である。イオンビーム中のイオン種の測定は、90度偏向磁石を用いて測定した。偏向磁石の偏向半径は250 mm であり、質量分解能 ($M/$

Fig. 4 The extracted ion current as a function of the applied voltage between the discharge chamber and the anode electrode. Ion extraction voltage was 8 kV.

ΔM) は47である。

3. 実験結果と検討

Fig. 3 に、引出し電圧を400 V から10 kV まで変えたときのマイクロ波イオン源からの酸素イオンビームの引出し電流を示す。図中、×印はマイクロ波電力が7 W のとき、●は15 W、○は22 W である。放電室-陽極間の電圧は70 V である。また、図の右側には、ビーム電流をアノードカップの面積で割ったイオン放出部でのビーム電流密度を示す。図から引出し電圧が400 V から約2 kV までのビーム電流は、空間電荷制限によって引出し電圧の3/2乗に比例して増加することが観察される。また、約2 kV 以上では引出し電圧によらずビーム電流はマイクロ波パワーに依存した一定の値になる。マイクロ波パワーが7 W のときの引出し電流は115 μA 、15 W では185 μA 、22 W では250 μA と、マイクロ波パワーの投入を増やすほどビーム電流が大きくなる。マイクロ波パワーが22 W でのビーム電流密度は、約 6.5×10^{-2} A/cm² であり、電子温度を10 eV としたときのアノードカップ内のプラズマ密度は、約 2×10^{12} cm⁻³ であると推測される。

Fig. 4 は、マイクロ波パワーを15 W、22 W としたときの、放電室-陽極間電圧による酸素ビーム引出電流の依存性を示す。マイクロ波パワー15 W、22 W のいずれにおいても、放電室-陽極間電圧を60 V から70 V と高くすることによって、ビーム電流が大きくなることが観察される。これは、放電室-陽極間電圧を高くすることによって放電室からアノードカップに流入する電子を多くするとともに電子エネルギーを高くすることによって、アノードカップ内のプラズマ密度が高くなるためで

Fig. 5 Energy dispersion as a function of the ion-extraction voltage.

あると考えられる。このことは、本実験で用いたイオン源の引出電流の制御が、マイクロ波投入パワーを変化させることによってできるとともに、放電室-陽極間電圧を制御することによっても可能であることを示している。

ビームエネルギーに対するイオンビームのエネルギー分散を測定した結果を、Fig. 5 に示す。放電室-陽極間電圧は、70 V である。図中、○はマイクロ波パワー22 W、●は15 W の結果である。4 keV から7 keV の間はエネルギー分散が30~40 eV であるが、8 keV のビームエネルギーではマイクロ波パワーが15 W 及び22 W のいずれに対しても約15 eV と小さいエネルギー分散の値が得られることが分った。

Fig. 6 に、8 keV の酸素ビームの質量分析を行った結果を示す。イオン源の動作条件は、マイクロ波パワー22 W、放電室-陽極間電圧70 V である。イオン種としては、 O_2^+ が最も多く、次に O^+ 、 O_3^+ などのイオン種が観察された。また、わずかではあるが不純物と考えられる H_2O のイオンも観測された。 O_2^+ の分子状のイオン種が多いのは、本イオン源のアノードカップが小さく、表面での酸素の再結合が多いためであると考えられる。 H_2O の不純物イオンは、ガス導入系の絶縁物としてシフフレックスを用いており、系が十分枯れていなかった

Fig. 6 Mass spectrum of the oxygen ion beam.

ためであると考えられる。全ビーム電流に対する O_2^+ イオンビームの割合は、約82%である。

4. ま と め

マイクロ波プラズマとビーム引出しプラズマとを分離したダブルプラズマ方式の小型マイクロ波イオン源を開発した。酸素イオンビーム引出し試験を行った結果、4 kV 以上の引出し電圧において22 W の小さいマイクロ波パワーで約 6.5×10^{-2} A/cm² の高い電流密度のイオン引出しができる。このイオン源は、ダブルプラズマ方式を採用した結果、放電室と陽極間の電圧を変えることによりビーム電流の制御が可能である。

イオンエネルギー分散を測定した結果、8 keV のイオンエネルギーにおけるエネルギー分散は15 eV であることが分った。またイオンの質量分析を行った結果、 O_2^+ イオンが主であることが観察された。

〔文 献〕

- 1) J. Ishikawa, Y. Takeiri and T. Takagi: Rev. Sci. Instr. 55 (1984) 449.
- 2) W. H. Urbanus, J. G. Bannenberg, S. Doorn, S. Douma, J. Ishikawa, F. W. Saris, R. Koudijs and P. Dubbeelman: Nucl. Instr. and Meth. A267 (1988) 237.