

拡散実験用2.45GHz ECRイオン源の動作特性

東條栄喜、片山一郎、川上宏金、鄭 淳讚、小柳津充広、石山博恒、
榎本一志、宮武宇也、渡辺 裕
高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

固体内の拡散実験装置に使用する目的で、平坦な軸方向磁界型の小型軽量ECRイオン源を製作し、照射試料に適合したビーム取り出し特性の改善を進めてきた。試料に照射して表面変位を均一にし、かつスパッタ効率を高めるイオン源の動作条件・ビーム引き出し条件を探索した。その概略を報告する。

1 まえがき

固体内の拡散実験用装置[1]に組み込む目的で2.45GHz ECRイオン源を設計製作し、そのビーム取り出し特性の改善を進めてきた[2][3]。このイオン源はRIビームの照射を受けた薄膜状試料にスパッタエッチングを行い、そのエッチング量と残留放射能を測定して固体内拡散の実験研究を行うためのスパッタビーム源として用いられるものである。

イオン源の動作パラメーターとしては、数keV-15keV前後のビームエネルギー、 10^{-7} - 10^{-6} Torr台の高真空環境で1mA程度のビームを ϕ 8以下の小スポットで試料に照射し、均一なスパッタエッチングの実現を目標としている。イオン源本体を製作したのちは、薄膜試料に照射して、ビームによる試料表面のスパッタ効率の向上と一様性の実現を目標にして、ビーム引出特性の改善を進めてきた。その過程で取り組んだ課題としては、試料の大きさに見合うビームスポットの縮小(ビーム電流密度の増加)と、5kV前後の比較的低い電圧領域と15kV前後の高電圧領域での照射条件の適正化、プラズマと取り出しビームの長時間安定化を図ったことである。このイオン源を組み込んで、試料のRIビーム照射・エッチング・変位測定・残留放射能測定を繰り返すシステムが構成される。

2 イオン源の構造と磁界構成

このイオン源本体の特徴としては第一に、円筒状の永久磁石・ヨークにより外形 ϕ 140×150程度の小型形状で、平坦な軸方向ECR磁界を実現してイオン化する方式をとっていることである。1価イオン用なので、径方向の6極磁界は用いず、軸方向磁界を平坦にすることで取り出しビームの拡散要因を減らすようにした[4]。第二に、RF窓をプラズマ室軸と垂直な位置に設置しているので、プラズマ電子の直撃による損傷の恐れがなく、ビーム軸上にRF窓がある場合に比べて、プラズマ及び取り出しビームの短時間・長時間安定性も大変良い。RF導入部はWRJ-2/WRJ-3の放熱板付きテーパ管を経て厚さ16mmの矩形偏平導波管を ϕ 78×110のプラズマ室円筒に結合している。偏平管とプラズマ室円筒を直角に結合した部分がRF結合器として機能し、TE₁₀/TE₁₁モード変換を実現している。簡潔化のため、ショートプランジャを省略した。軸方向磁界の平坦長は約80mmで、平坦度は $\pm 1.5\%$ 以内に収まった。

図1はRF導入部・イオン源本体とアインツェルレンズを結合した断面図である。

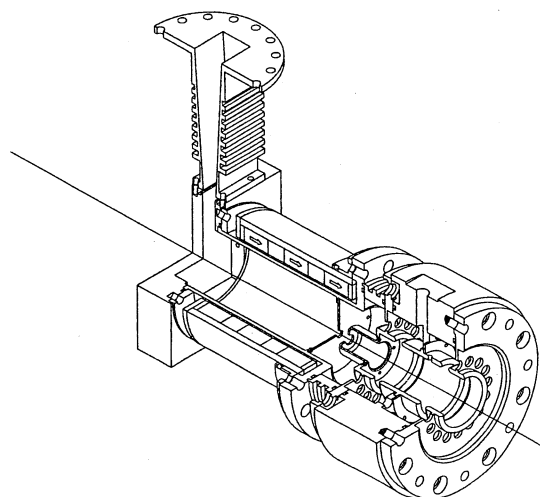


図1 イオン源の構造断面

3 ビーム取り出し特性

照射試料の材質に応じて、その表面を効率よくスパッタできるように、ビーム取り出し電圧が8kV以下の場合と、15kV前後で用いる場合に分けて、いずれの場合も照射ビームが ϕ 8以内のスポットで0.5~1.2mAの範囲で均等に照射できることを目標にした。前者の領域では通常の2極構成(プラズマ電極と引き出し電極)で問題ないことが分かったが、後者の領域では同一焦点に必要なビーム値が得られなかったため、3極構成にした。

3.1 低電圧領域の取り出し

図2に8kV以下で用いる場合の、イオン源本体とあわせた引き出し部の断面を示した。ビームの照射スポットを ϕ 7~8以内にできる、ビーム取り出し電圧の有効動作範囲を探した。その結果、引出側の動作圧力を 10^{-7} Torr台の前半で動作させれば、微少なガス流量でも数kVで1mA前後のビームが得られることが分かった。 10^{-6} Torr台にもビーム量の増加する動作領域があるが、ビームスポットは増大する。レンズの口径は当初、ビームの均一性を重視して大口径(ϕ 46/70/46)にしたが、ビームスポットが広がりすぎるので等口径に縮小(ϕ 46/46/46)した結果、取り出し電圧2kV以下は交換前と大差ないが、3kV以上では ϕ 7のスポット内での収束効果とビーム値が明らかに増加した。図3はその測定結果である。引出し電極電圧はすべて-2.5kVに固定して印加した。8kV以上では全ビーム値は増えるが、 ϕ 7のスポット分は減少し、全成分を有効に絞りきれない。

なおテストスタンドでは、図2に示したアインツェルレンズ(イオン源と一体化)の下流にもう一組のアインツェルレンズ(口径 ϕ 38)を装着しているが、殆ど使用せず、図示した引出電極とレンズだけで収束可能であった。

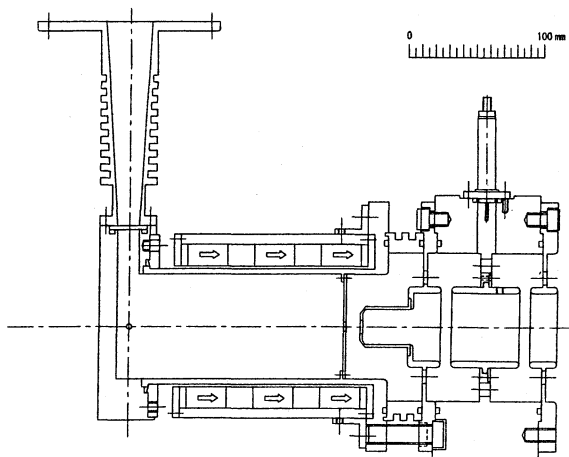


図2 2極型のビーム取り出し構造

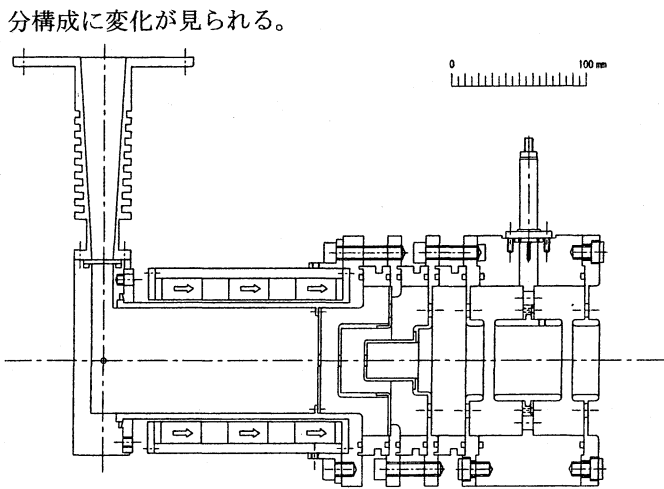


図4 3極型のビーム取り出し構造

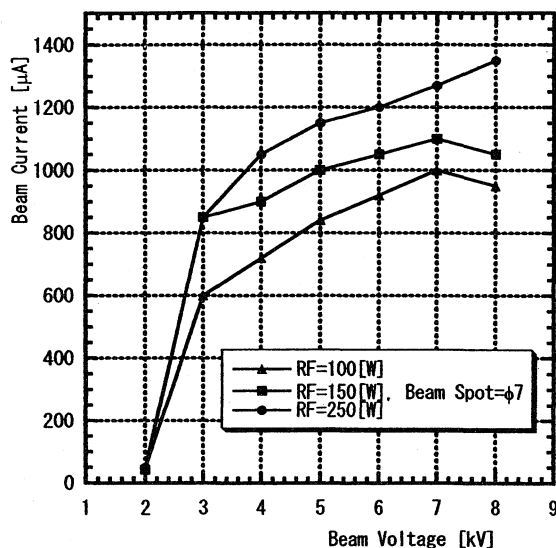


図3 2極型のビーム取り出し特性

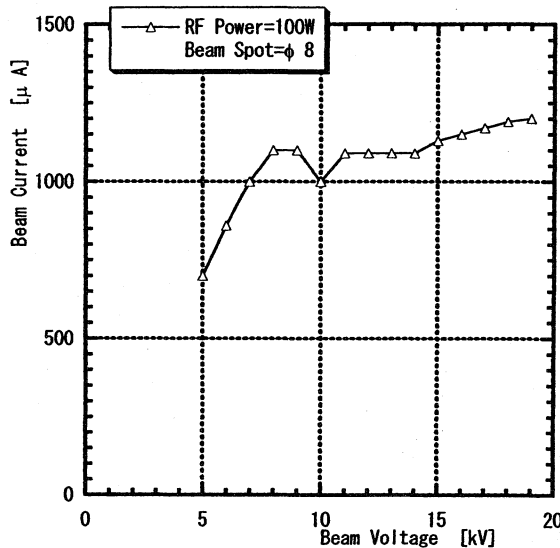


図5 3極型のビーム取り出し特性

3.2 高電圧領域の取り出し

多成分物質のスパッタリングの場合、試料のスパッタ効率、照射ビームが軽粒子よりも重粒子ほど向上し、また同一粒子ビームの場合はエネルギーを数10keVまでの範囲で高くした方が増加する[5]。

そこで引き出し電圧を15kV前後に引き上げて使う場合も想定し、前述の2極型でビーム取り出しを試みたが、同一物点での収束性が低下し、同一スポットのビーム値も低下したので、引き出し部を補助電極付きの3極構成にして取り出した。その構造と典型動作例が図4、5である。この方式ではP. Spadtke ほか[6]、R. Leroy ほか[7]の報告を参考にして電極間隔と口径その他を決めた。いずれもECRイオン源に於いて、1-2mAのビームを10~20kVの引出し電圧領域で細い平行ビーム取り出しを目標としているので、ほぼ同じ動作条件である。

図5の測定ではビーム電力の増加に見合う、ファラデー・カップの放熱処理が不十分なため、10kV以上でのビーム値は正確に測れなかった。ビーム値の増加に関してはまだ最適化の余地がある。なおこの場合の取り出しビームは10kVを境にして、φ8のスポット内に収まるビーム成

分構成に変化が見られる。

4 試料プレート(CaF₂)への照射

図6はCaF₂の試料円板に8keVのArビームを1.1mA、スポット径φ7で約20分間照射(パルス幅25ms, 繰り返し20pps)したときの、スポット内側と周縁部をレーザー変位計で測定したスパッター深さと、その3次元合成のグラフの例である。ビームスポットの中心部については±1.5μm程度の起伏、周縁部では約4μmの段差がついており、スポット内では照射前の起伏と同程度の一様さになっている。このときの引出側の動作真空度は4×10⁻⁷ Torrであった。

図7は同じくCaF₂の試料円板に15keVのArビームを0.9mA、スポット径φ8で5分間照射(パルス幅10ms, 繰り返し50pps)した時の周縁部と内側の変位を示す。この場合のスパッタによる段差は1.09μmであった。同一ビーム電流・同一照射面積・同一照射時間に換算すると、8keVの場合の約7倍のスパッタ量になる。これは数10kV以下の範囲では、照射エネルギーの高い方がスパッタ効率が上がるとい、これまでの報告例[5]と一致する結果である。

なお15keVの照射で、パルスビームを(10ms, 50pps)から

(25ms, 20pps)に変更したところ(デューティは50%で同一値)、スパッタ変位量は約2.4倍になった。パルス幅の延長でスパッタ効率は上がったが、どこまで比例的に増せるかは未詳である。DCビーム(100%デューティ)の照射も試みたが、試料の周りの真空環境で照射効果が変わりやすい。

5. まとめ

固体内の拡散実験装置で、スパッタエッチングに適合した小型軽量で動作が安定なECRイオン源を製作し、できるだけ一様で平行なビーム取り出しを行い、スパッタ効率を上げることを目標に開発を進めてきた。

現在、CaF₂試料については、数分間のパルス照射で1-2 μmのスパッタ変位ができるようになった。今後の課題としては、ビームスポット内の中心部と周辺部の、より均一なスパッタ動作の実現、10⁻⁷Torr台前半での真空動作環境の改善、多種の試料への適応性などの問題が残っている。また誘電体試料種の場合、照射による試料表面の荷電蓄積が無視できない場合の対策も課題になるかも知れない。

本イオン源のRF導入部とレンズの改造に関しては、当機構・工作センターの小林勝治氏、寺島眞一氏に多大なご協力を戴いた。また照射試料CaF₂の表面測定には同センターの渡辺勇一氏、(株)KEYENCE社の倉元康次氏のご協力を戴いた。併せて感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 片山他：京大原子炉実験所研究会報告, KURRI-KR-60, 1-2, 2000.
- [2] 東條他：第12回粒子線の先端的応用技術に関するシンポジウム(BEAMS 2001) 報告集, 17-20, 2001.
- [3] 東條他：第1回21世紀連合シンポジウム論文集, 427-429, 2002.
- [4] T. Taylor and J.F. Mouris : Nucl. Instr. and Meth. A336, 1-5, 1993.
- [5] G.Bets and G.K. Wehner : Sputtering by Particle Bombardment II , edited by R. Behrisch, 58-59 ; Springer-Verlag, 1983.
- [6] P. Spadtke et al. : Rev. Sci. Instrum. 65, 1431-1434, 1994.
- [7] R. Leroy et al. : Rev. Sci. Instrum. 67, 1350-1352, 1996.

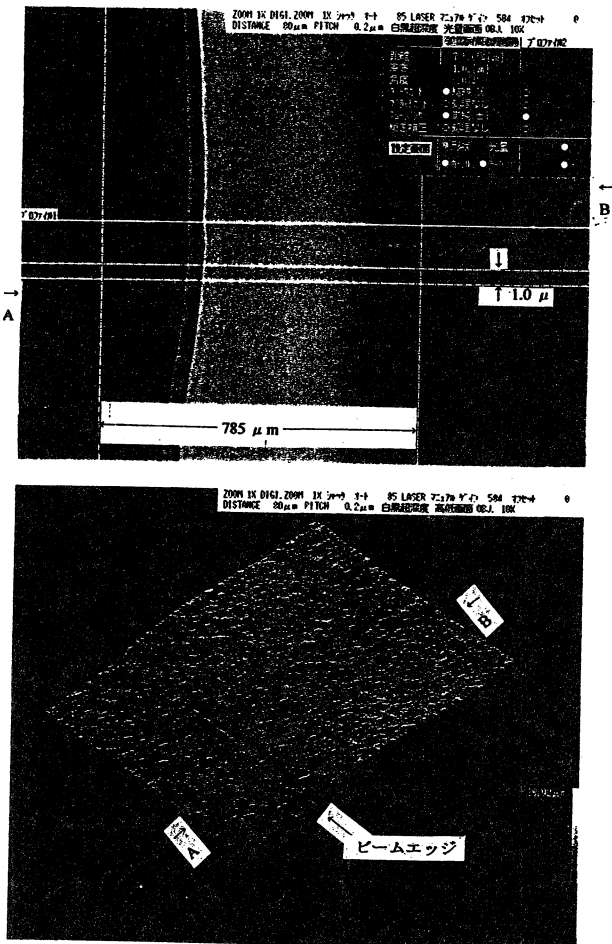


図6 8kV, 1.1mA のArビームによる照射変形

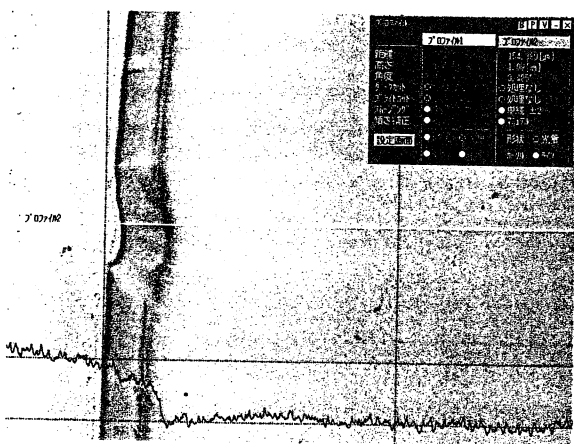


図7 15kV, 0.9mAのArビームによる照射変形