

FREQUENCY TUNING EFFECT AND DOUBLE FREQUENCY HEATING IN ECR ION SOURCES

E. TOJYO, Y. OHSHIRO, M. OYAZU, Y. SHIRAKABE and T. SHOUJI*

Institute for Nuclear Study, Univ. of Tokyo, Tanashi-shi, Tokyo 188, Japan

*Plasma Science Center, Nagoya Univ., Nagoya 464-01, Japan

ABSTRACT

Variable microwave frequency operation has been tested in order to maximize an extracted ion beam in compact ECR ion sources with permanent magnets only. In addition, "double frequency heating" experiments have also been examined in the region of 2.4-2.6 GHz for the purpose of an extension of the ECR principle. Some experimental results are reported shortly.

ECRイオン源の周波数調整効果と複周波数加熱

1. まえがき

筆者たちは核研において、これまでに永久磁石だけを用いた小型軽量ECRイオン源を複数種開発してきた¹⁾。その際にマイクロ波周波数を変化させてビーム調整を行う可能性も併せて検討してきた。通常、2.45GHzのマグネトロン発振器を用いると周波数は固定されるが、進行波管・半導体増幅器を用いる場合は数百MHzの動作帯域が可能になる。こうした選択が可能になるのは6GHz以上の帯域か、または2.45GHz帯であってもECRイオン源を線形加速器などと同期運転し、マイクロ波源に特別な仕様が課される場合である。

このような動作帯域の設定に加えて、筆者たちはECRイオン源の動作原理の拡張の一試みとして、動作帯域内で2種類の周波数のマイクロ波を入射した場合の加熱効果の増進・ビームの増加の可能性を追求してきた。そのために一方のマイクロ波は固定周波数、他方は帯域内で可変周波数とし、ビームの増加をもたらす組合せがあるかどうかを実験的に検討してみた。この課題は核融合プラズマの分野では既に複周波数加熱効果として確認されており²⁾、ミラー磁界内の電子の反跳周波数の奇数倍にマイクロ波周波数差を設定した時に加熱効率が增大する。しかしECRイオン源では動作周波数帯域とプラズマ寸法が大きく違うので、スケールアップが成り立つかどうか問題である。以下にこれらの課題に対する測定・実験結果を述べる。

2. イオン源本体+伝送回路の帯域特性

図1にマイクロ波系と測定システムを示した。筆者たちの製作したイオン源本体は、左右対称な、二つのRFポートを備えている。プラズマ室の内寸は、モノカスプ型が $\phi 32 \times 72 \text{mm}^3$ 、ミラー+6重極型が $\phi 38 \times 72 \text{mm}^3$ であり、WRJ-3の導波管断面と同程度であ

る。通常は一方のRFポートだけ(マグネトロン側)を使用し、他方はショートブランジャーで短絡しておく。このイオン源を後述するように、マイクロ波周波数を調整して動作させるために、帯域特性を測定した。測定と実験の容易化のため、伝送回路も左右対称に構成した。伝送損失は主にテーパ管部とRF窓部に集中しているので、このセクションの電力伝達効率を γ とすると、無負荷時にPiの入力が一方から入射してプラズマ室に到達する電力Peは、 $Pe = \gamma Pi$ 、他方に透過する電力Poは、 $Po = \gamma^2 Pe$ となる。Pi, Poは実測できるから γ が求まり、従ってPeが算出できる。このようにして図2のグラフを得た。この場合には2.36-2.58GHzで $\gamma = 80-85\%$ 、 $\gamma^2 = 63-72\%$ という結果となった。マイクロ波周波数を調整要素としてビーム取り出しに活かすには、中心周波数に対して全幅で10-20%程度の帯域幅が必要と考えられるが、上の結果はその最低限の幅が実現していることを示している。

3. ビーム取出しへのマイクロ波周波数調整効果

図2の帯域特性のもとで、マイクロ波周波数を変化させた時のArビームの取り出し量を測定し、図3に示した。ここで定在波モードとは他方のマイクロ波ポートを短絡した、通常の場合であり、準進行波モードとはプラズマに吸収されなかった電力を他方のポートへ流した場合を言う。両者の差はビーム収量に関しては大差がないが(但しこの二つのグラフでは動作条件が若干違うのでビーム量の絶対値の比較はできない)、周波数に対する分布の形は違っている。いずれの場合も、測定帯域内で最大30%程度のビーム量の変化が出ている。

図4はモノカスプ型ECRイオン源でHeイオンについて、周波数調整と流量調整を同時に行った場合のグラフである。周波数を変えていくと、2390 MHz

付近で鋭いピークがあり、最大60% 程度の変化が認められる。

これらの結果はビーム取出しに関して、閉じ込め磁界が固定されている場合でも、動作帯域内でのマイクロ波周波数の変更でビーム調整が一定程度可能なことを示している。

4. 複周波数加熱によるビーム取出し実験

図5にガス流量・動作真空度・ビーム電圧・引出し電圧を一定に保った状態で、周波数の異なる2種類のマイクロ波を入射した場合の、ビーム引出し特性の例を示した。(a)はミラー・6重極型のイオン源を使用した場合で、測定帯域の範囲で2種類のマイクロ波を混ぜても変化が確認できず、合計値に等しい電力を単一のマイクロ波電力で置き換えても結果は殆ど同じであった。また(b)はモノカスプ型 ECR イオン源を使用した場合の二重加熱によるHeビーム取り出しの例で、反射電力を減らすために通常の動作状態よりもガス流量を多くし、 10^{-5} Torr台で測定した。基準(固定)周波数と約70MHz ずれた点に20% 程度のピークが出たが、この測定ではまだ、プラズマに吸収されなかったマイクロ波電力の多重反射による干渉効果が多く残っているので、周波数差に起因する二重加熱に特有の効果とは断定できない。このような不確かさはあるが、ピークが20% 以内に留まったことは、もし二重加熱効果が含まれていても、実用性に乏しいということになる。

これら二つの事例から判断する限り、核融合プラズマで確認された複周波数加熱効果は、2.45GHz帯の小型 ECR イオン源では、ビーム収量の大幅な増加には結び付かないと考えられる。

5. あとがき

以上の測定と実験結果から、2.45GHz 帯のコンパクト ECR イオン源の可変周波数動作に関して、いくつかのことが明確になった：

- 1) 通常の導波管伝送部品で平坦帯域幅を全幅で10% 程度に実現できる。設計当初から個々の部品の帯域特性を改善すれば更に拡大可能であること。
- 2) 所定の帯域幅の中で周波数を調整することにより、取り出しビームの最適化・最大化に用立てることができる。ビーム収量との関係は、イオン種と他の動作条件によって多様である。
- 3) 2周波数の差が120MHz以内の範囲で、二重加熱によるビーム収量の大幅な増加は、筆者たちの使用した2.45GHz帯の小型イオン源では認められなかった。
- 4) モノカスプ型の場合は特に、ガス流量を減らすと両RFポートとも反射電力が増大して、定量的な測定が困難になる。

こうして、ビーム取り出しへの(単一)周波数調整効果は確認できたが、複周波数加熱効果のビーム増量への可能性については、2.45GHz帯では否定的な結果となった。もし可能性があるとすれば、今後はプラズマ寸法に対してマイクロ波波長が同程度かそれ以下の、10GHz以上の帯域で検討したほうが有意だと考えられる。

参考文献

- 1) E. Tojyo, Y. Ohshiro, M. Oyaizu and Y. Shirakabe: Proc. of the 11th International Workshop on ECR Ion Sources, p.234(1993)
- 2) J. E. Howard, M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg: Proc. of the Second EBT Ring Physics Workshop; CONF-811203(1982)

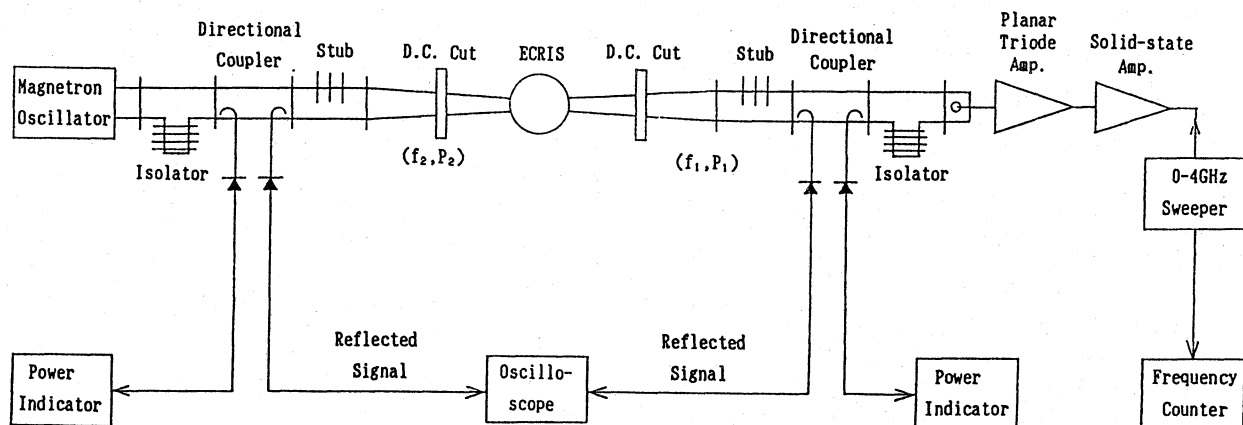


図1 マイクロ波供給システム及び測定システムの構成

