

電子サイクロトロン共鳴多価イオン源における軽質量元素ガスミキシング効果 による多価イオン生成の高効率化とエミッタンス測定

ENHANCED PRODUCTION OF MULTICHARGED IONS BY MIXING LOW Z GAS AND EMITTANCE MEASUREMENT ON ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE ION SOURCE

藤村優志[#], 岩原亘輝, 加藤裕史

Yushi Fujimura, Koki Iwahara, Yushi Kato

Division of Electrical, Electronic and Infocommunications Engineering, Osaka University

Abstract

We have been studying efficient production of multicharged ions on an electron cyclotron resonance ion source. There are various methods for efficient production of multicharged ions. One of the methods is mixing low Z gas in the plasma. The purpose of this study is to measure parameters related to ion temperatures for typical pure Ar ion beam and He mixed Ar ion beam. The results showed that root mean square emittance of Ar²⁺ ion beam in the case of Ar mixed with He was lower than that of pure Ar. In the future, we plan to conduct heating low Z ions selectively by ion cyclotron resonance with low frequency electromagnetic waves.

1. 背景と目的

電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源 (ECRIS) は多価イオンビームの形成が可能であり、重粒子線がん治療 [1] や半導体分野などで利用されている。ECRIS から引き出されるイオンビームの質を向上させるためには、多価イオン生成の高効率化が求められる。これまでに考えられてきた多価イオン生成高効率化の手法は多岐にわたる [2]。それらの手法の 1 つに軽質量元素ガスミキシング法がある [3]。ガスミキシング法とは、目的のイオンに対して軽い元素のガスを混入させると多価イオン収量が増加する効果を利用した手法であり、これは効果的であるためしばしば利用される。ガスミキシング法の原理はまだ完全には解明されていないと思われるが、質量の異なるイオン同士の衝突によって重い方のイオンが冷やされることで磁場閉じ込め時間が長くなることから多価イオン生成効率が上がると考えられている。また、ガスミキシング時のプラズマに対して、従来の ECR よりも低周波数のマイクロ波の導入によって軽い方のイオンへ選択的にイオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 加熱を行うことで冷却効果を助長し、目的の多価イオン収量がさらに増加されることが期待されている。

本研究の目的は、我々グループの ECRIS [4] においてガスミキシング法による多価イオン収量増加効果を確認し、そのときのイオン温度に関するパラメータを取得することである。多価イオン収量増加効果は、典型的な純 Ar プラズマ (pure Ar) に対する質量価数分布 (CSD) 測定の結果と He ガスミキシング時の Ar プラズマ (Ar/He) に対する CSD 測定の結果を比較することで確認した。また、ガスミキシング前後でのイオン温度に関するパラメータは、エミッタンス測定から得られる 2 乗平均平方根 (rms) エ

ミッタンスをそれぞれに対して取得することで比較した。さらに、ガスミキシング前後においてラングミュアプローブによるプラズマパラメータの測定も行い、それぞれの電子密度 (n_e) および電子温度 (T_e) も比較した。

2. エミッタンスの原理

エミッタンスとは、ビームの拡散の程度を表す物理量であり、ビームの質の評価に用いられる。ビームの進行方向を z 方向として、 x 方向のエミッタンス ε を以下の式によって定義する [5]。

$$\varepsilon = \int x' dx \quad (1)$$

ここで x' は x 方向のビームの広がる角度であり、 x , z 方向の速度 v_x , v_z を用いて $x' = v_x/v_z$ と表すことができる。次に、rms エミッタンスを以下の式で定義する。

$$\varepsilon_{\text{rms}} = \sqrt{x^2 x'^2 - x^2 x'^2} \quad (2)$$

ここで、イオンビームの引き出し口は半径 a の円形であり、ビームの空間分布がガウス分布に従うとすると、 $\overline{x^2}$ は

$$\overline{x^2} = \frac{\int_0^a 2x^2 y dx}{\int_0^a 2y dx} = \frac{a^2}{4} \quad (3)$$

で表される。また、引き出されるイオンが温度 T_i を持ち、速度分布がマクスウェル分布に従うとするならば $\overline{x'^2}$ は

$$\overline{x'^2} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x'^2 \exp\left(-\frac{mv_x}{2k_B T_i}\right) dv_x}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{mv_x}{2k_B T_i}\right) dv_x} = \frac{k_B T_i}{mv_z^2} \quad (4)$$

で表される。ただし、 m はイオン質量であり、 k_B はボルツマン定数である。引き出し口において x と x' が無相関であると仮定すると、Eq. (2)-(4) より、rms エミッタンスは

[#]fujimura@nf.eie.eng.osaka-u.ac.jp

$$\varepsilon_{\text{rms}} = \sqrt{x^2 x'^2} = \frac{a}{2} \left(\frac{k_B T_i [\text{K}]}{m v_z^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{a}{2} \left(\frac{T_i [\text{eV}]}{2ZV} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

となる。ここで Z は引き出されたイオンの価数であり、 V は引き出し電圧である。リュビルの定理よりビーム輸送によってエミッタンスは変化しないとすると、ビームラインでのエミッタンス測定によって引き出し口におけるイオン温度が推定できる。また、ビーム電流の累積分布関数 F と rms エミッタンス ε_{rms} は以下の関係式にあることが知られている。

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{2\varepsilon_{\text{rms}}}\right) \quad (6)$$

マルチスリット法によって rms エミッタンスを取得する場合は、まずマルチスリット通過ビーム電流分布からエミッタンス図を作成し、各領域でのエミッタンス値を得る。次に、典型的なビーム電流分布と対応付けることでエミッタンスの累積分布関数を表すグラフを作成する。得られたデータ点を Eq. (6) でフィッティングすることによって rms エミッタンス ε_{rms} が算出される。

3. 実験装置と実験手順

本研究において我々が使用した装置全体の上面図を Fig. 1 に示す。我々の装置はプラズマ生成部 (ECRIS)、ビームライン、計測及び照射部 (IBIS) に分けられる。ECRIS は、ミラーコイル A、B、調整用コイル C、八極永久磁石によって磁場が構成された真空容器である。代表的な磁場強度の z 軸上の分布は Fig. 1 の中に示した。通常、コイル A、B の電流量は 150 A であり、コイル C の電流量は 10 A 前後で調整される。図中の破線は、我々が ECR で用いる電磁波の周波数が 2.45 GHz であるため、磁場強度が 0.875 T となる点で共鳴が起きることを表している。真空排気は、ECRIS では 3000 l/s の油拡散ポンプ、ビームラインと計測部ではそれぞれ 260 l/s、400 l/s のターボ分子ポンプによって行われる。ECRIS、ビームライン、IBIS にそれぞれ B-A ゲージを設置しており、各部での圧力を常時監視できる。ECR 用の 2.45 GHz マイクロ波は2か所から導入できる。一方は上流側から

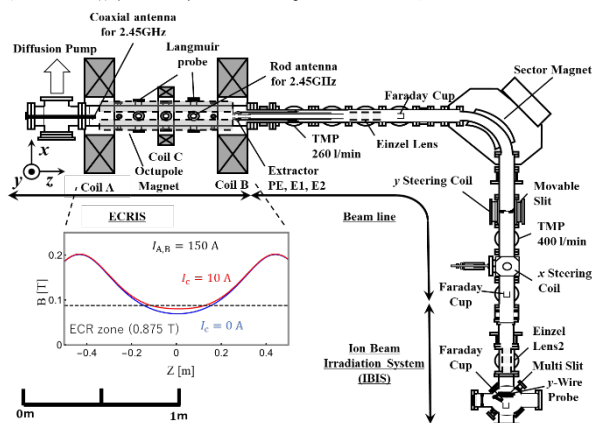


Figure 1: The top view of ECRIS.

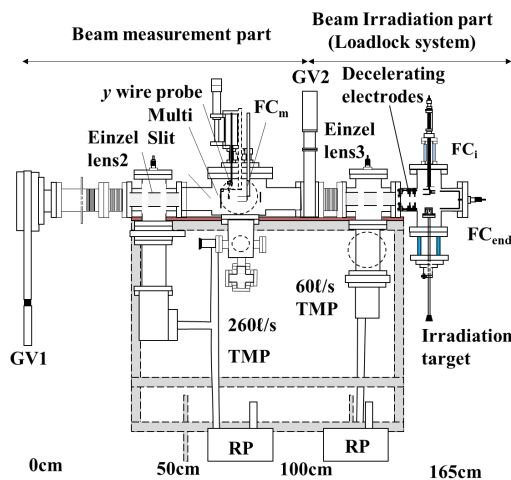


Figure 2: The side view of measurement part of IBIS.

同軸に導入され、もう一方は下流側の真空容器側面から垂直に導入される。ガス導入にはマスフローコントローラーが用いられ、Ar や He のガス流量が調整できる。

我々の ECRIS では、真空容器側面からラングミュアプローブを挿入することでプラズマパラメータが測定できる。プローブは真空容器の上流側と下流側の2か所に設置されており(それぞれのプローブは LP1、LP2 と呼ばれる)、どちらも $x = 0 \sim 50 \text{ mm}$ で調整できる(真空容器の軸中心が $x = 0 \text{ mm}$)ため、プラズマパラメータの x 方向に対する分布測定が可能である。また、プラズマ中のイオンは真空容器下流に設置した電極 PE、E1、E2 によってビームラインに引き出される。通常、 $V_{\text{PE}} = 10 \text{ kV}$ によってビームが形成され、 $V_{\text{E1}} = -1 \sim 0 \text{ kV}$ によって最適化される。また、ビームライン上の Einzel Lens によっても最適化は行われる。引き出されたイオンビームは分析磁石によって特定の質量価数比のイオン種のみ分離され、ファラデーカップで捕集される。ビームライン上には可動スリットが設置されており、捕集されるビーム電流量を調整できる。分析磁石の作る磁場を変動させ、ファラデーカップで捕集したイオンの電流量と変動磁場を同時に計測することでビーム電流の CSD 測定が可能である。

ビームライン上のファラデーカップを退避させ、ゲートバルブ GV1 を開くことによって IBIS へイオンビームを導入できる。計測部の側面図を Fig. 2 に示す。計測部にもファラデーカップが設置されており、ビーム電流量を測定できる。引き出されたイオンビームは Einzel Lens 2 によって再び最適化される。計測部では、ステッピングモーターによって y 方向に可動なワイヤープローブ(直径 0.02 mm)を用いることでビーム電流の y 方向分布測定が可能である。また、ワイヤープローブの 10 mm 上流にマルチスリット(縦幅 0.5 mm のスリットが 2.1 mm 間隔で 11 個並んでいる)が挿入可能であり、マルチスリット通過ビーム電流の y 方向分布測定も可能である。ビーム電流の y 方向分布測定をマルチスリット挿入有無のそれぞれに行うことでエミッタンス計測が可能である。

今回の実験では、まず ECRIS から引き出されたイオン

ビーム電流量の CSD を測定し、コイル電流 C 、引き出し電極 $E1$ 、Einzel Lens によって Ar^{8+} の電流量を最適化した。次に He ガスを導入してビーム電流量の CSD 測定を行うことで、 Ar^{8+} などの多価イオン電流量が増加することを確認した。このとき He ガスミキシングの有無それぞれに対してエミッタンス測定を行った。また、He ガス導入を止めると多価イオン電流量が元に戻ることも確認した。

4. 実験結果

4.1 ECRIS から引き出したイオンビーム電流量の質量価数分布 (CSD) 測定

我々の ECRIS で生成された pure Ar プラズマおよび Ar/He プラズマに対する CSD 測定結果を Fig. 3 に示す。ECRIS 内での動作圧力はミキシング前では 2.1×10^{-4} Pa であり、He ガスミキシング時は 2.6×10^{-4} Pa であった。マイクロ波導入は同軸上および真空容器側面の 2 か所から行っており、合計の入射パワーは 290 W であった。引き出し電圧 $V_{PE} = 10$ kV によって形成されたビームにおいて、 Ar^{8+} のビーム電流量が最大となるようにコイル電流 I_c 、引き出し調整電圧 V_{E1} 、Einzel Lens 電圧 V_{e1} をそれぞれ最適化した。グラフの横軸は分析磁石の作る磁場 (質量価数比の平方根と比例する) を示し、縦軸はファラデーカップで捕集したビームの電流量を対数で示している。青線は pure Ar プラズマに対する CSD を示しており、赤線は Ar/He プラズマに対する CSD を示している。今回の実験では、Ar イオンビームのピークは 1~8 価のものまで確認された。また、Ar/He における低価数イオン電流量は pure Ar プラズマでの電流量と比べて同程度であるのに対して、 Ar^{8+} などの高価数のイオン電流量は増加していることが読み取れる。代表的なイオンのビーム電流量として、 Ar^{2+} 電流量は pure Ar と Ar/H のどちらに対しても 4.0×10^{-7} A であり、 Ar^{8+} 電流量は pure Ar では 5.7×10^{-9} A であるのに対して Ar/He では 1.1×10^{-8} A であった。今回取得した CSD 測定結果では Ar と He 以外のピークも見られ、これらは主に H、C、N、O などの不純物によるものであると考えられる。

4.2 Ar^{2+} ビームに対するエミッタンス測定

ECRIS で生成した pure Ar プラズマと Ar/He プラズマ

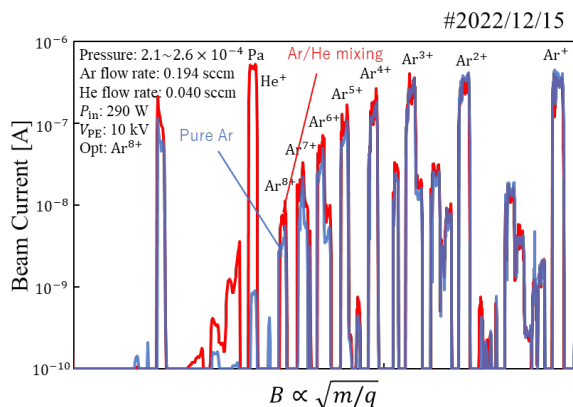


Figure 3: CSDs of Ar plasma for pure Ar and Ar/He mixing.

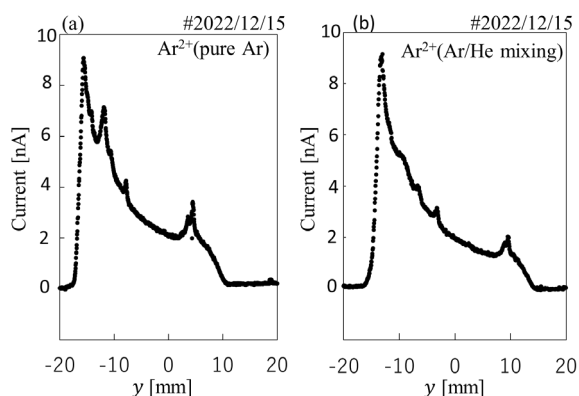


Figure 4: Typical Ar^{2+} beam profiles for pure Ar (a) and Ar/He mixing (b).

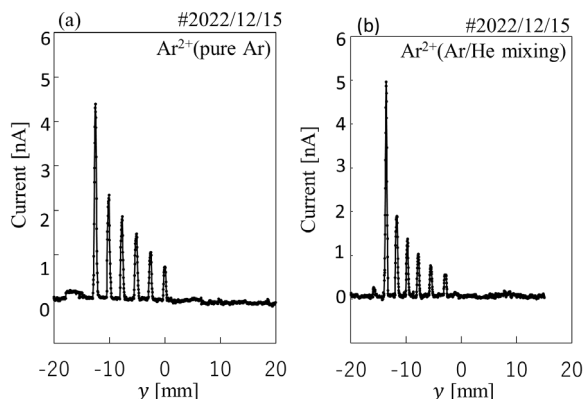


Figure 5: Ar^{2+} beam profiles when the multi slit was inserted for pure Ar (a) and Ar/He mixing (b).

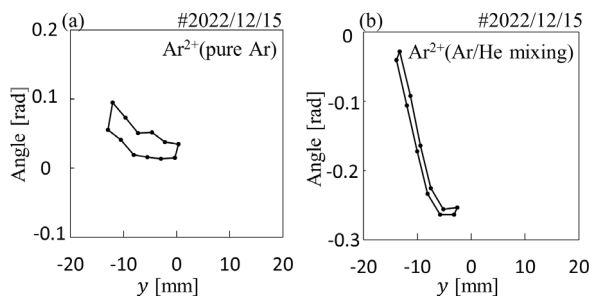


Figure 6: Emittance diagrams of Ar^{2+} beams for pure Ar (a) and Ar/He mixing (b).

において、計測部まで引き出した Ar^{2+} ビーム電流量の y 分布をワイヤープローブによって測定した (Fig. 4)。このとき、 Ar^{2+} ビームは Einzel Lens 2 によって調整されている。次に、マルチスリットを挿入した時のビーム電流量の y 分布を、pure Ar プラズマと Ar/He プラズマのそれぞれに対して測定した (Fig. 5)。マルチスリット通過ビーム電流のピークはそれぞれ 6 本ずつ確認された。Figure 5 から各ピーク幅を読み取り、マルチスリットのスリット間隔およびマルチスリットとワイヤープローブの距離を考慮してマルチスリット通過 Ar^{2+} ビームの広がる角度をそれぞれのピーク位置において計算し、エミッタンス図 (Fig. 6) を得た。図中の各領域での面積がエミッタンス値を表しており、得られた全領域でのエミッタンス値は pure Ar では

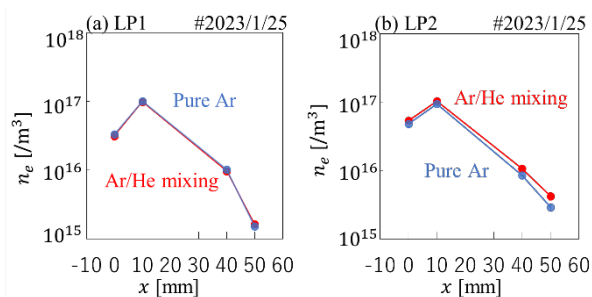


Figure 7: n_e distribution diagrams for pure Ar (a) and Ar/He mixing (b).

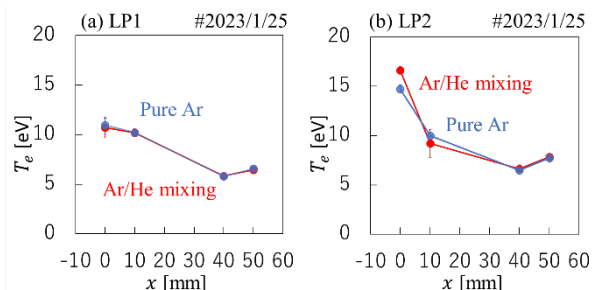


Figure 8: T_e distribution diagrams for pure Ar (a) and Ar/He mixing (b).

$\varepsilon = 423$ mm mrad であるのに対して、Ar/He では $\varepsilon = 242$ mm mrad であった。

4.3 ECRIS におけるプラズマパラメータ測定

ECRIS に挿入した可動式ラングミュアプローブに電圧を印加し、そのときに流れた電流特性から得られたプラズマパラメータの x 分布測定結果を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。プラズマパラメータ測定は pure Ar プラズマと Ar/He プラズマの両方に対して行った。実験時の動作圧力は 2.1×10^{-4} Pa であり、He ガスミキシングによる圧力変化はほとんど見られなかった。また、マイクロ波は同軸上と真空容器側面の2か所から導入され、合計の入射パワーは 290 W であった。Figure 7 では $x = 0 \sim 50$ mm の位置で測定された電子密度を示した。この図からは He ガスミキシングの有無による電子密度の変化はほとんどないことがわかった。また、Fig. 8 では $x = 0 \sim 50$ mm の位置で測定された電子温度を示した。電子温度も He ガスミキシングの有無による変化はあまり見られなかった。

5. 考察

Figure 6 のグラフの中で囲まれた領域の面積がエミッタンス値となる。それぞれのエミッタンス図を Fig. 4 で示した Ar²⁺ビームプロファイルと照らし合わせることで、各位置のエミッタンスとビーム電流の累積分布関数の対応関係を得た (Fig. 9)。Figure 9 のグラフ中の曲線は、プロットされた点を理論式 Eq. (6) によってフィッティングした線であり、このとき rms エミッタンス ε_{rms} が算出される。今回の実験で得られた pure Ar での Ar²⁺ビームの rms エミッタンスは $\varepsilon_{rms} = 297$ mm mrad であり、Ar/He での Ar²⁺ビームの rms エミッタンスは $\varepsilon_{rms} = 151$ mm mrad であった。これらの結果から、Ar²⁺ビームにおける rms エミッタンスは He ガスミキシングによって約半分にまで減少

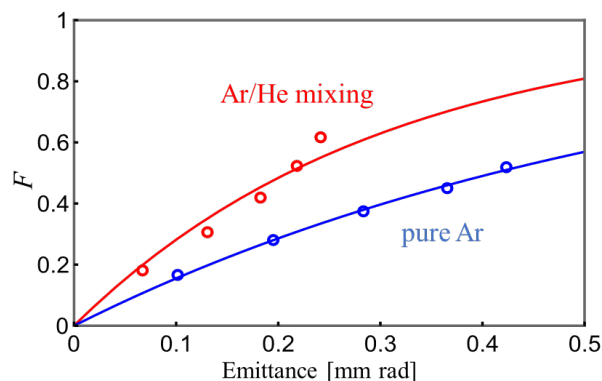


Figure 9: Cumulative emittance distribution function F vs. emittance ε .

Table 1: Comparison of Results Using Two Methods

| | ε_{rms} by method 1 | analytical ε_{rms} by method 2 |
|--------------|---------------------------------|--|
| pure Ar | 297 mm mrad | 95.1 mm mrad |
| Ar/He mixing | 151 mm mrad | 76.7 mm mrad |

することが確認された。

rms エミッタンスの解析手法は、ビーム電流の累積分布関数とエミッタンス図から得られるエミッタンス値を理論式にフィッティングする方法以外に、rms エミッタンスの定義式 Eq. (2) 中の変数をマルチスリット挿入時のビームプロファイル (Fig. 5) から直接算出して代入する方法も存在する [6]。これら2通りの解析手法による結果を Table 1 に示して比較する。表中では、前者の方法を method 1、後者の方法を method 2 とした。それぞれの解析手法によって得られた rms エミッタンスには差があったが、He ガスミキシング時に減少する特徴はどちらの解析手法でも確認できる。2つの解析手法で近い値の結果が得られなかったのは、マルチスリット通過ビーム電流のプロファイル (Fig. 5) がイオンビーム全域にわたって得られなかったことが原因であると考えられる。この課題は今後の計測系の修正によって改善される予定である。

6. まとめと今後の予定

本研究では、pure Ar プラズマと Ar/He プラズマのそれぞれに対してビーム電流の CSD 測定、エミッタンス測定、プラズマパラメータ測定を行い、それらの結果を比較した。ビーム電流の CSD 測定結果の比較によって、He ガスミキシングによる Ar プラズマの多価イオン収量増加効果が確認された。また、エミッタンス測定から得られた rms エミッタンスの比較によって、He ガスミキシングによる Ar²⁺ビームの rms エミッタンス ε_{rms} の減少が確認された。さらに、プラズマパラメータ測定結果の比較によって、He ガスミキシングによる Ar プラズマの電子密度 n_e および電子温度 T_e の変化はほとんどないことが確認された。

今後はエミッタンス測定装置の修正および解析手法の改善を行い、より高価数の Ar イオンビームや、He イオンビームに対しても rms エミッタンスを取得する予定であ

る。また、軽質量元素ガスマキシング時に ICR 加熱用電磁波を導入し軽質量元素ガスを選択的に加熱することによって、さらなる多価イオン収量増加を目的とする実験も行う予定である。

参考文献

- [1] A. Kitagawa, *et al.*, “Review on heavy ion radiotherapy facilities and related ion sources (invited)”, Rev. Sci. Instrum. 81, 2010, 02B909.
- [2] A. G. Drentje, Rev. Sci. Instrum. 74, “Techniques and mechanisms applied in electron cyclotron resonance sources for highly charged ions”, 2003, pp.2631-2645.
- [3] A. G. Drentje, “THE ECR ION SOURCE AND ASSOCIATED EQUIPMENT AT THE KVI”, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B9, 1985, pp526-528.
- [4] Y. Kato, *et al.*, “Accessibility condition of wave propagation and multicharged ion production in electron cyclotron resonance ion source plasma”, Rev. Sci. Instrum. 87, 2016, 02A710.
- [5] I. G. Brown, “The Physics and Technology of Ion Sources”, 1989, pp92-94.
- [6] M. Zhang, “Emittance Formula for Slits and Pepper-Pot Measurement”, Fermilab-TM, 1998.