

レーザーイオン源用静電イオンアナライザの高分解能化

IMPROVEMENT OF RESOLUTION OF ELECTROSTATIC ION ANALYZER FOR LASER ION SOURCE

松本友樹[#], 片根弘登, 宮崎翔, 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志

Yuki Matsumoto[#], Hiroto Katane, Kakeru Miyazaki, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi

^{A)}Nagaoka University of Technology

Abstract

A laser ion source provides an ion beam extracted from a plasma produced by irradiating a high power laser on a solid target. Ion species contained in the plasma are analyzed with an electrostatic ion analyzer. The analyzer bends ion orbits by electrostatic field between two deflection electrodes and allows us to estimate the mass-to-charge ratio of ions by time-of-flight (TOF) method. In order to distinguish ions, the spectral width of ion signals in the mass spectrum must be smaller than the TOF difference between the ions. To improve the resolution of the analyzer, we considered the analyzer structure for reducing the spectral width. In this study, we investigated experimentally the variation of the spectral width of ion signals with a proposed electrostatic ion analyzer. The results showed that the spectral width was shortened by reducing the width of the additional slit placed between the focal point of the electrostatic analyzer and the analyzer exit. Therefore, the resolution of the analyzer can be improved by adding a slit to the analyzer.

1. はじめに

レーザーイオン源は固体ターゲットに高出力のパルスレーザーを集光して照射することで固体から直接生成したプラズマからイオンビームを供給するイオン源である。特徴として、レーザーパワー密度を大きくすることで、多価イオンの生成が容易である点とプラズマがターゲット表面に対して垂直に大きなドリフト速度を持つ点がある。近年、レーザーイオン源は重イオン慣性核融合のためのエネルギードライバー[1]や加速器駆動中性子源のためのLiイオン源[2, 3], KEK デジタル加速器のための炭素イオン源[4]として期待されており、レーザーパワー密度を調節することで要求される価数のイオンの生成が試みられている。

レーザーイオン源から出力されるイオン種の特定は、2つの扇形電極間に発生する電場によってイオン軌道を曲げて Time-of-flight (TOF)法で質量電荷比を評価する静電イオンアナライザが用いられている。静電イオンアナライザは、2つの扇形電極間で発生する電場により、荷電粒子を偏向してエネルギーとイオン種を特定する質量分析器であり Fig.1 に示すような構造になっている。静電イオンアナライザで得られる信号波形はスペクトル状である。レーザーイオン源ではプラズマが高いドリフト速度をもってアナライザに進入するため、 ${}^7\text{Li}^{3+}$ イオンと ${}^{16}\text{O}^{7+}$ イオンのように質量電荷比が近く高速なイオン種が存在する場合、飛行時間に差が出にくくなる。これらのイオンの分離観測には数 10 ns 程度以下のスペクトル幅が求められるため分離観測には高い質量分解能が求められる[5]。

ここで、スペクトル幅が有限の幅を持つ理由は2つ挙げられる。1つは、アナライザ内を異なる速度で通過するイオンが検出器に到達するためである。TOF 法で評価しているため、イオンの速度が異なると到達時間に差が生じ、スペクトル幅が増加する。しかし、中心軌道を通す

る速度以外の速度を持つイオンは中心軌道からずれた位置に出力されるため、アナライザ出口に設置されている焦点スリットを狭めることでスペクトル幅は小さくすることができる。スペクトル幅が有限の幅を持つもう1つの理由が、アナライザが形成する電場がイオンの軌道に対してレンズのように働き、アナライザ内を同じ速度で異なる軌道を通すイオンが検出器に到達するためである。イオンが異なる軌道を通す場合、同じ速度でも輸送距離が異なるため到達時間に差が生じる。また、これらのイオン軌道は焦点スリットが設置されている位置に集束するため、焦点スリットを狭めても制限することができない。そのため、焦点スリットだけではスペクトル幅をある値から小さくすることができない。

そこで、よりスペクトル幅を小さくするため、同じ速度で

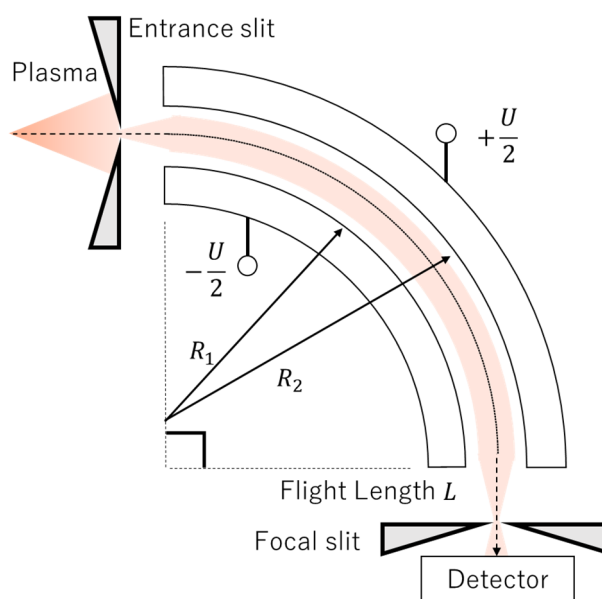


Figure 1: Schematic of electrostatic ion analyzer.

[#]matsumoto_yuki@stn.nagaokaut.ac.jp

異なる軌道を通るイオンを制限するスリットをアナライザ出口-焦点間に追加した構造を検討し、イオン軌道を数値計算してスペクトル幅を求めた。その結果として、追加スリットを狭めることでスペクトル幅をより小さくできることが示された[6]。

本研究では、静電イオンアナライザの分解能改善のため、数値計算で確かめた追加スリットの幅に対するスペクトル幅の変化を実験的に調べ、その有効性を検討した。

2. 静電イオンアナライザの測定原理

静電イオンアナライザは、2つの扇形偏向電極、アナライザ入口と出口のスリット、検出器からなる。この偏向電極に大きさの等しい正負の電圧を印加すると、偏向電極間に電場が発生する。電極間の中心軌道を通り得る荷電粒子の運動エネルギーは、以下の式で表される。

$$\frac{1}{2} A m_{amu} v^2 = Z e \frac{U}{2 \ln(R_2/R_1)} \quad (1)$$

ここで、 A は質量数、 m_{amu} は原子質量単位、 v はイオンの入射速度、 Z はイオン価数、 e は素電荷、 U は扇形電極の電位差、 R_1 は内側扇形電極の曲率半径、 R_2 は外側扇形電極の曲率半径である。Eq. (1)より、電極の中心軌道を通り得るイオン速度 v は質量電荷比によって定まる。レーザーイオン源では、Time-of-flight (TOF)法を用いてイオンの速度 v を求められ、観測時間と質量電荷比 A/Z の関係はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$v = \frac{L}{t} \quad (2)$$

$$\frac{A}{Z} = \frac{e}{m_{amu}} \frac{U}{\ln(R_2/R_1) L^2} t^2 \quad (3)$$

ここで、 L はイオンのターゲットから検出器までの輸送距離、 t はプラズマ発生からの検出器到達までの時間である。

電圧 U に応じたスペクトルとなるため、TOF法によって観測した速度 v を用いて質量電荷比 A/Z を特定する。ここで注意することは、上記は電極の中心軌道を通り得る粒子のみを考えている点である。実際には、中心軌道外を通り得る検出器に到達するイオンも存在するため、得られるスペクトルは有限の幅を持つ。

ここで、分離観測したいイオン種同士のスペクトル幅はそれぞれの検出器への到達時間の差から見積もることができる。分離観測したいイオン1とイオン2の質量電荷比の関係が $(A_1/Z_1) < (A_2/Z_2)$ である場合、静電イオンアナライザに電圧 U を印加している時の出力されるイオン種間の速度の関係はEq. (1)より

$$v_1 = \sqrt{\frac{A_2/Z_2}{A_1/Z_1}} v_2 \quad (4)$$

であり、質量電荷比が小さいイオンがより速い速度で出力される。そのため、検出器に到達する時間差 Δt は

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right)$$

$$= \left(1 - \sqrt{\frac{A_1/Z_1}{A_2/Z_2}} \right) \frac{L}{v_2} \quad (5)$$

である。そのため、イオンの各スペクトル幅(半値全幅)が同じであると仮定すると、各スペクトル幅が時間差 Δt よりも十分に小さければ分離観測が可能となる。

3. 実験方法

入口スリット、焦点スリット、アナライザ出口-焦点スリット間に追加スリットを有する静電イオンアナライザを用いた質量分析の実験系をFig. 2に示す。実験系の構成要素はNd:YAGレーザー、ターゲット、イオンコレクタ、静電イオンアナライザである。Nd:YAGレーザーは波長、エネルギー、パルス幅がそれぞれ532 nm, 250 mJ, 18 nsであり、ターゲット上でスポット直径0.1 mm程度に集光した。このときのレーザーパワー密度は 2.0×10^{11} W/cm²である。

本実験のレーザーターゲットは銅とした。銅を用いた理由は、金属Liは酸化しやすく取り扱いが難しい点と銅は安定同位体の⁶³Cuと⁶⁵Cuが存在し、⁷Li³⁺イオンと¹⁶O⁷⁺イオンの分離観測に必要な質量分解能に比較的近いためである。質量分解能は以下の式で表され、⁷Li³⁺イオンと¹⁶O⁷⁺イオン、⁶³Cuと⁶⁵Cuの分離観測に必要な質量分解能はそれぞれ48.0と31.5である。

$$\text{Mass resolution} = \frac{(m/z)}{\Delta(m/z)} \quad (6)$$

イオンコレクタはステンレスの板で作られておりプラズマからイオン電流のみ計測するため、-50Vの負電位にバイアスすることでプラズマから電子を追い返してイオン電流を測定した。また、測定位置はターゲットから1450 mmとした。

静電イオンアナライザのレイアウトをFig. 3に示す。静電イオンアナライザは、サイズ210 mm x 210 mm、厚み5 mmのアルミボックス内に2つの扇形電極を配置している。内側扇形電極は $R_1 = 150$ mm、厚み20 mm、外側扇形電極は $R_2 = 160$ mm、厚み20 mmである。アルミボックスの入口および出口のアーチャー径は6 mmである。入口スリットはボックス外壁に取り付けており、電極から15 mmの位置である。追加スリットは電極から15 mmの位置であるボックス外壁に取り付けている。焦点スリットはボックス外壁から110 mmの位置に固定している。

検出器には浜松ホトニクス製の2次電子増倍管(SEM: Secondary Electron Multiplier)のR2362を使用し

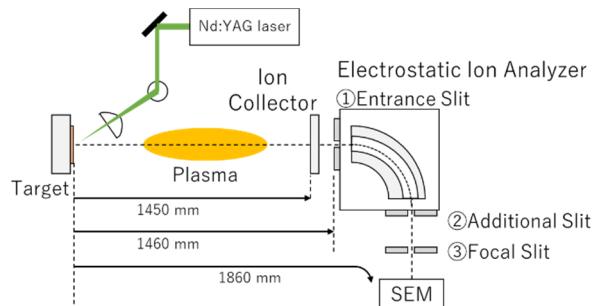


Figure 2: Schematic of experimental setup.

た。SEM に -4 kV を印加し、さらに Fig. 4 に示した増幅度 100 倍の電流帰還増幅回路で電流信号を増幅してオシロスコープで電圧波形を観測した。電流帰還増幅回路は、スルーレート $1000\text{ V}/\mu\text{s}$ のオペアンプ AD8001 を使用して、電源電圧は $\pm 4.5\text{ V}$ で駆動させた。SEM の周囲で圧力が $6.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ となるまで真空引きした後、実験を行った。

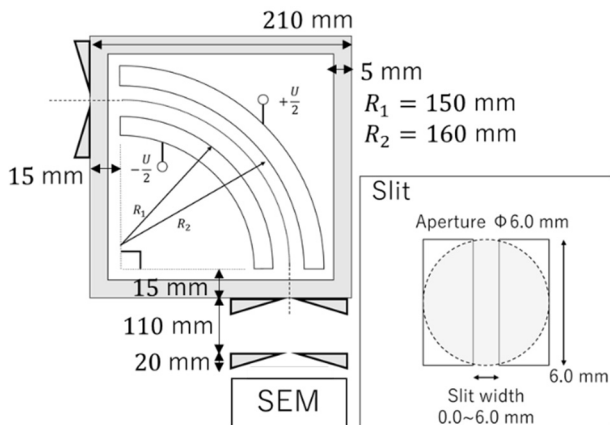


Figure 3: Layout of electrostatic ion analyzer.

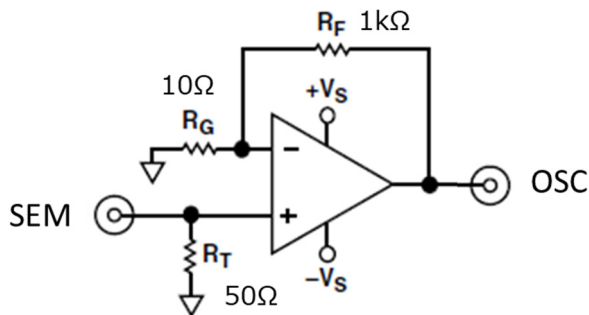


Figure 4: Circuit of current feedback amplifier.

4. 実験結果と考察

イオンコレクタで測定したイオン電流波形を Fig. 5 に示す。イオン電流が $10 \sim 30\ \mu\text{s}$ 程度で観測されており、TOF 法から求まるイオンのドリフト速度は $48 \sim 145\text{ km/s}$ 程度である。このプラズマを静電イオンアナライザで質量分析した結果、扇形偏向電極への印加電圧 $U=100\text{ V}$ の時に最大のピーク強度を持つスペクトルが得られた。そこで、印加電圧 $U=100\text{ V}$ で入口スリットと焦点スリットの幅をそれぞれ 1.0 mm , 1.0 mm とし、追加スリット無しおよび追加スリットの幅を 3.0 mm , 2.0 mm , 1.0 mm と変化させて得られたスペクトルを Fig. 6 に示す。このうち最大のピーク強度が得られている Cu^{4+} のスペクトルに注目した。 $^{63}\text{Cu}^{4+}$ イオンのスペクトル幅は追加スリットがない状態から 1 mm 幅に狭めるとスペクトル幅(半値全幅)が 80 ns から 60 ns に減少した。また、そのピーク強度が半分以下に低下していることが分かる。このように、追加スリットにより、スペクトル幅とピーク強度が減少することが分かった。

入口・出口スリット幅をそれぞれ 0.5 mm , 1.0 mm とした場合の追加スリット幅に対する $^{63}\text{Cu}^{4+}$ イオンのスペクトル

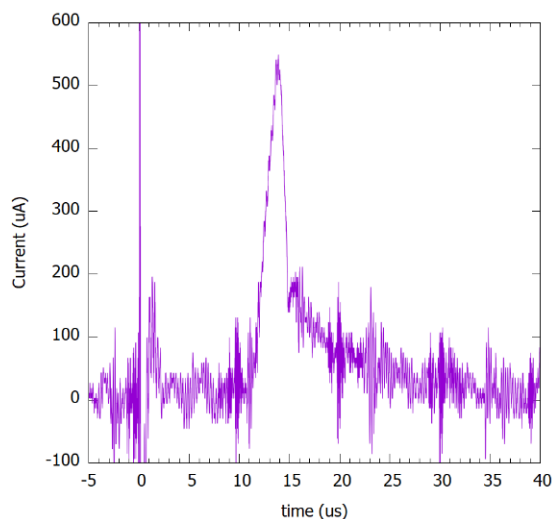


Figure 5: Ion current waveform of ion collector.

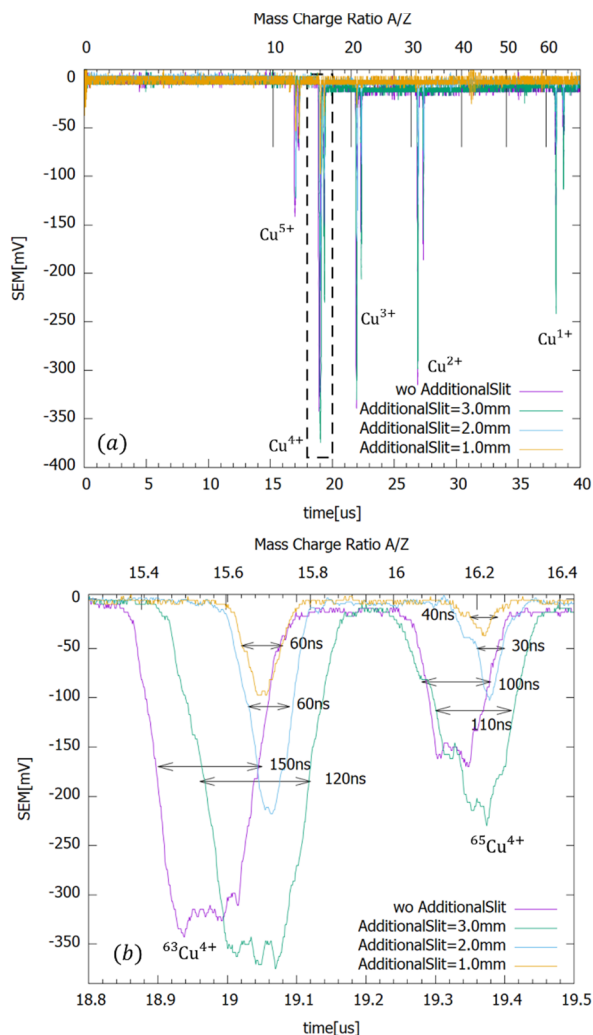


Figure 6: (a) Spectral diagram obtained with the electrostatic analyzer with the additional slit. The width of entrance and focal slit were fixed 1.0 mm and the deflection electrodes was biased at $U=100\text{ V}$. (b) Enlarged view of Cu^{4+} .

ル幅および追加スリット幅に対するピーク強度を Fig. 7 に示す。点線は 3 回の実験で得られた信号を平均したものである。Figure 7(a)より、追加スリット幅を小さくすることでスペクトル幅が低下していることが分かる。入口・焦点スリット幅 1.0 mm の場合はスペクトル幅の平均値がおよそ 100 ns から 70 ns に減少し、入口・焦点スリット幅 0.5 mm の場合はスペクトル幅の平均値が 60 ns から 30 ns に減少した。これは、同じ速度で異なる軌道を通るイオンを追加スリットが制限したためだと考えられる。

また、Fig. 7(b)より、ピーク強度も追加スリット幅が小さくなるほど低下していることが分かる。特に入口・焦点スリット幅 0.5 mm、追加スリット幅 0.5 mm 時は信号が確認できないほど信号強度が低下した。低下した理由は、追加スリットで検出器に到達するイオンを制限したためであるといえる。このように、追加スリット幅を小さくすることで信号

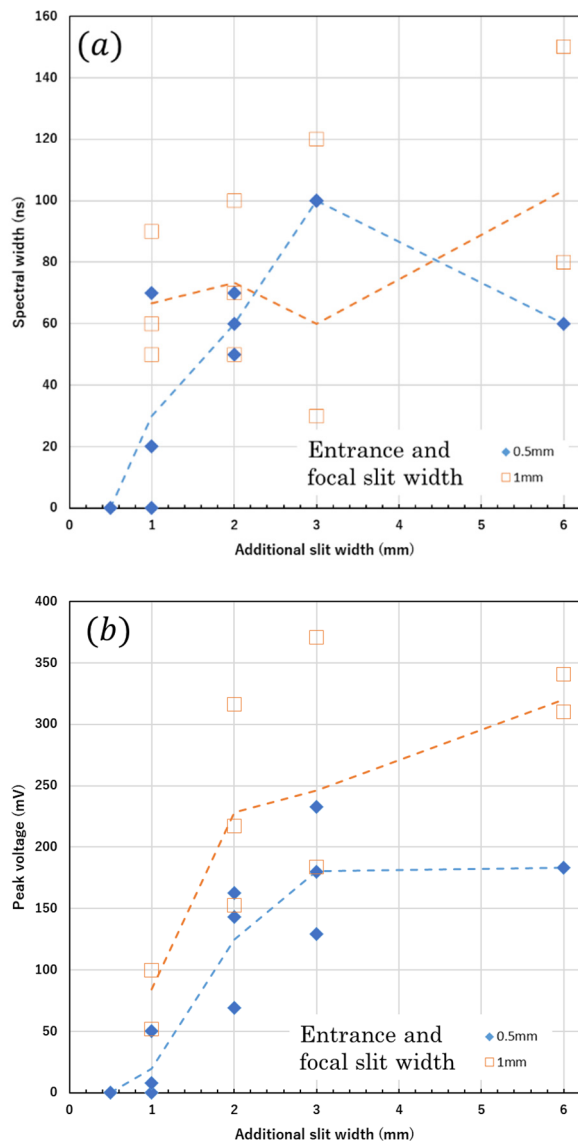


Figure 7: (a) Spectral width and (b) peak of the signal of $^{63}\text{Cu}^{4+}$ ion as a function of the additional slit width. The points are the data of each shot, and the dashed lines are the average values of the data of 3 shots.

強度が低下するが、スペクトル幅が小さくなり分解能を向上させられることが分かった。

ここで、Li レーザーイオン源で加速器駆動中性子源開発を目指したイオンフラックスを得るためのレーザー照射条件で実際に生成されるアブレーションプラズマの速度は、参考文献[3]より最大 200 km/s である。この速度 $v_{\text{Li}} = 200 \text{ km/s}$ の $^7\text{Li}^{3+}$ イオンと $^{16}\text{O}^{7+}$ イオンを本実験系で検出する場合、検出器に到達する時間差 Δt は Eq. (5) より 95.4 ns である。一方、本実験系で得られるスペクトル幅は最小で 30 ns 程度である。よって、 $^7\text{Li}^{3+}$ イオンと $^{16}\text{O}^{7+}$ イオンの検出器に到達する時間差 Δt よりも十分に小さいスペクトル幅を得られるため、 $^7\text{Li}^{3+}$ イオンと $^{16}\text{O}^{7+}$ イオンを分離観測できる静電イオンアナライザを構築できた。

5. まとめ

本研究では、静電イオンアナライザの分解能改善のため、アナライザ出口-焦点間にスリットを追加した構造のアナライザを構築し、追加スリット幅に対するスペクトル幅の変化を実験的に調べた。その結果、追加スリット幅を小さくすることで、信号強度が低下するものの、スペクトル幅が小さくなり分解能が向上することが分かった。また、 $^7\text{Li}^{3+}$ イオンと $^{16}\text{O}^{7+}$ イオンの検出器に到達する時間差 Δt よりも十分に小さいスペクトル幅を得られるため、構築した静電イオンアナライザで $^7\text{Li}^{3+}$ イオンと $^{16}\text{O}^{7+}$ イオンを分離観測が可能である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H05399 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] M. Okamura *et al.*, "Laser ablation ion source for heavy ion inertial fusion", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 733, 2014, pp. 97-102.
- [2] S. Ikeda *et al.*, "Neutron generator based on intense lithium beam driver", Rev. Sci. Instrum. 91, 2020, pp. 023304-1-5.
- [3] A. Cannavò *et al.*, "Optimization of laser-target parameters for the production of stable lithium beam", Rev. Sci. Instrum. 91, 2020, pp. 033317-1-5.
- [4] N. Munemoto *et al.*, "Development of the C6+ laser ablation ion source for the KEK digital accelerator", Rev. Sci. Instrum. 85, 2014, pp. 02B922-1-5.
- [5] M. Okamura *et al.*, "Calcium and lithium ion production for laser ion source", Rev. Sci. Instrum. 87, 2016, pp. 02A901-1-3.
- [6] Y. Matsumoto *et al.*, "電気学会研究会資料", The Papers of Technical Meeting on "Electrical Discharges, Plasma and Pulsed Power", IEE Japan, EPP-20-046~055・057~058, July, 2020, pp. 53-57.