

レーザーイオン源用静電アナライザー電極の製作

DESIGN OF ELECTROSTATIC ANALYZER ELECTRODES FOR LASER ION SOURCE

山田圭介[#], 柏木啓次

Keisuke Yamada[#], Hirotsugu Kashiwagi

Department of Advanced Radiation Technology, QST

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

We are developing a laser ion source to provide low-charge heavy ion beams for the ion implanter in TIARA. Small electrostatic analyzer electrodes, the central orbital radius of which is 25 mm were designed and constructed for applying a higher voltage to analyzer electrodes in order to measure charge distribution of low velocity laser plasma. A charge distribution measurement of carbon plasma was performed using these analyzer electrodes. In the result, the detected time of each charge state ion was in agreement with the calculated value, and the total current waveform estimated from analyzed current of each charge state ion was correspond to waveform of total ion current.

1. はじめに

量研機構高崎量子応用研究所のイオン注入装置[1]は、主に新機能材料創製及び半導体や光学素子の開発に使用されており、様々な元素の高強度イオンビームが求められる。現状では、イオン注入装置に搭載されるフリーマン型イオン源を用いてイオン生成を行っており、水素からビスマスまでのうち、40種類以上のイオンを生成することが可能である。しかし、金属や希土類元素の一部などの高融点元素は、実験に求められるマイクロアンペアオーダーのビーム電流量を得ることができきない。これらの元素は試料加熱用オープンでも十分な蒸気圧が得られないため、プラズマチェンバー中に固体試料を設置してイオン生成を行っているが、この方式では得られるビーム電流は100 nA程度と少なく、さらに時間と共に減少する[2]。

これらの問題を解決するために、我々はイオン注入装置搭載用の新たなイオン源として、レーザーイオン源に着目した。レーザーイオン源はレーザーを固体ターゲットに集光照射することで、固体試料を直接プラズマ化して、あらゆる固体元素の高強度イオンビームを生成することが可能である。また、ターゲットを駆動させ、一定パルス毎新しい面にレーザーを照射することで、ビーム電流の減少という問題も解決することができる。そこで我々は、イオン注入装置で求められる1価、2価の様々な元素の低価数イオンを生成するレーザーイオン源の開発を行っている[3]。低価数のイオン生成に最適なレーザーエネルギー密度を明らかにするためには、生成するプラズマ中のイオンの価数分布を測定する必要がある。しかし、既存の高価数イオン分析用の軌道半径150mmの静電アナライザー電極では、低価数イオン生成用にエネルギー密度を下げて生成した低速のプラズマからイオンを分離するために必要な電極間電場を印加できないため、価数分析が困難である。そこで、電極印加電圧を高めた軌道半径の小さいアナライザー電極の設計・製作を行った。本報告では、電極の設計及び動作試験結果について報告する。

[#]yamada.keisuke@qst.go.jp

2. レーザーイオン源テストベンチ

本研究では、レーザー装置(Continuum製Nd:YAGレーザー、波長1064nm、エネルギー~480mJ/pulse、パルス幅5-7nm)、光学系、ターゲットチェンバー、ファラデーカップ(FC)、及び静電アナライザーで構成されるレーザーイオン源テストベンチを使用している(Figure 1)。レーザーはターゲット面垂直方向から45度の角度で集光照射する。レーザー集光径は約22μmである。生成したプラズマ中のイオン電流は、ターゲット面から1.6mの距離に設置したφ10mmのアパーチャーを有するFC1で測定する。また、下流に設置された静電アナライザーにプラズマを導くことで、価数分布の測定が可能である。ターゲット-FC2間距離は2.1mである。

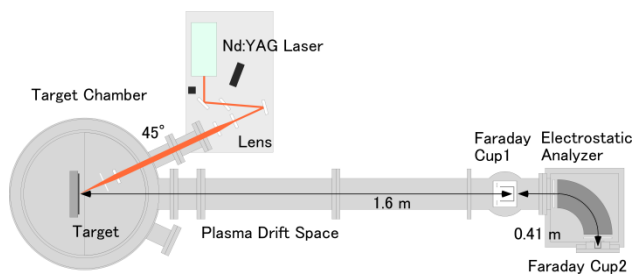


Figure 1: Layout of laser ion source test bench.

3. 小型アナライザー電極の設計

静電アナライザーは対向する2枚の円筒形電極間に電圧を印加し、電極間の静電場を利用して荷電粒子の価数とエネルギーを分析する装置である。本テストベンチでは、レーザー生成プラズマを静電アナライザーに導き、電極間の電場で入射したプラズマからのイオンの分離と軌道の偏向を行う。電場強度により電極を通過するイオンの価数及びエネルギーの条件が異なるため、これを利用して価数分布を測定することができる。

静電アナライザー内側電極の外径を r_1 、外側電極の内径を r_2 とすると、運動エネルギー E [eV] を持った価数 z の荷電粒子を通過させるために各静電アナライザー電極に印加する電圧 V [V] は(1)で求められる。

$$\pm V = \frac{E}{z} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

また、運動エネルギー E は荷電粒子の質量 m [kg] 及びターゲットから 1.6 m 離れた FC1 でのイオン検出時間 t [s] から(2)で求められる。

$$E = \frac{m}{2e} \left(\frac{1.6}{t} \right)^2 \quad [\text{eV}] \quad (2)$$

既存の静電アナライザー電極は偏向角 90 度の円筒形で、中心軌道半径 150 mm (R150mm) 及び電極間隔 5 mm である。Q-Switch の動作時間を調節してエネルギーを高価数炭素イオン生成時の約 1/10 の 45 mJ (2.1×10^{12} W/cm²) に低下させ、グラファイトターゲットにレーザーを照射した時の FC1 の波形を Figure 2 に示す。Figure 2 及び(2)から、エネルギー 45 mJ で生成したプラズマの運動エネルギーのピークは 1.1 keV であった。したがって、既存電極で炭素イオンの各価数を分析するために印加する電圧は最小で数 V となり、測定の結果、入射するプラズマからイオンを分離するのに十分な電場が印加されていないことがわかった。そこで、このような低速プラズマにおいても正しく価数分析を行うため、既存電極による高価数炭素イオン分析時と同程度の電場を印加可能な軌道半径の小さい静電アナライザー電極を新たに製作した。本電極は、電極間隔 5 mm で中心軌道半径は 25 mm (R25mm) であり、既存アナライザー用の真空チャンバーを利用するため、偏向角は既存電極と同じ 90 度とした (同一価数・エネルギーのイオンを分析する印加電場は既存電極の 6 倍)。R25mm 電極を既存真空チャンバーに設置した際のレイアウトを Figure 3 に示す。入射側及び出射側に設置している 2 つの可変スリットはチャンバー側に設置されている。そのため、電極

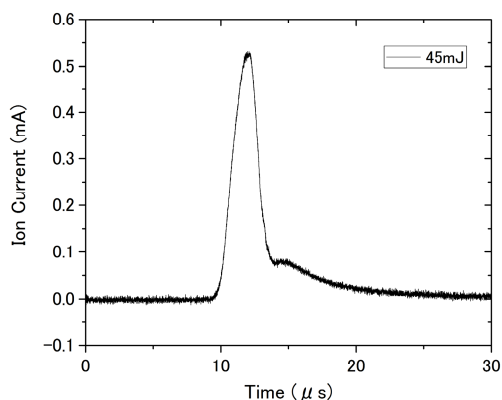


Figure 2: Time evolution of ion current at 1.6 m from target.

を小型化することで、スリット入射側電極端に約 135 mm のドリフトスペースが生じる。電極に電圧を印加した際に、電場の漏れが入射粒子の軌道に影響を与えると考えられる。そのため、電極にアース電位のカバーを設置した。入射側及び出射側に電極間隔と同じ幅 5 mm のスリットを開け、カバーと電極の入射及び出射側の距離は 2 mm とした。カバーの効果を確認するため、簡易的に入射粒子を正イオンとしたときの粒子の軌道をイオン光学設計ソフト SIMION で計算した。カバーの有無に

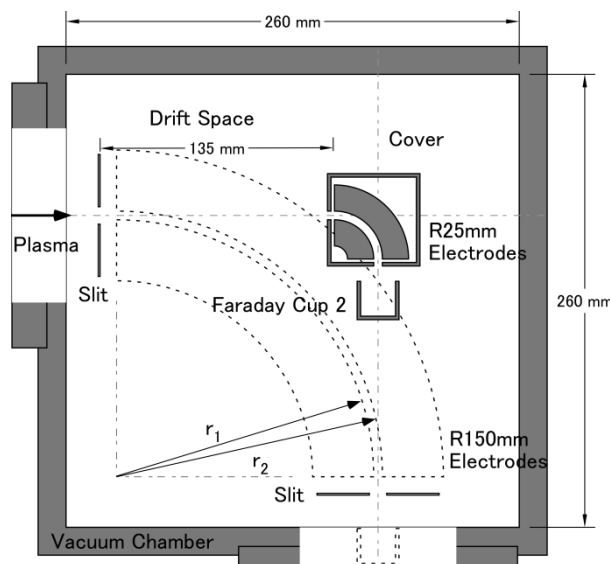


Figure 3: Layout of electrostatic analyzer.

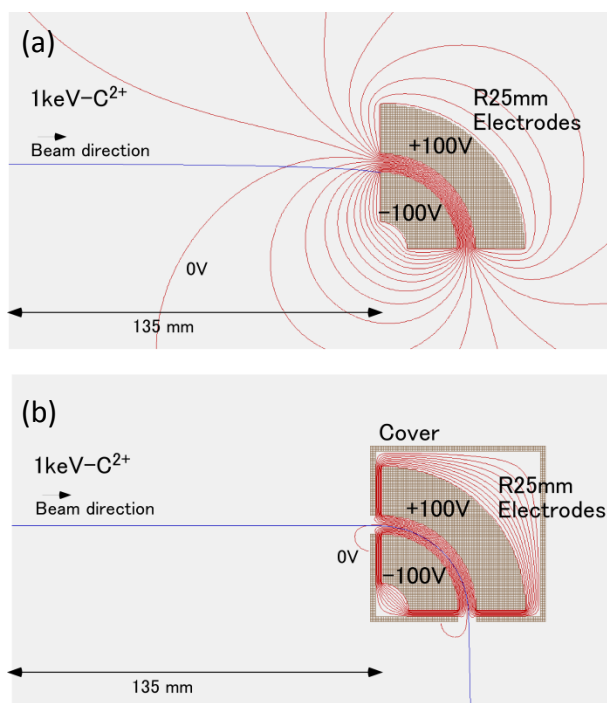


Figure 4: Simulation of ion beam trajectory of 1keV-C²⁺. Blue lines are ion beam trajectories and red lines are equipotential lines every 10V (from -100 to +100 V). (a) Only electrodes (b) With Cover.

よる 1keV-C²⁺の軌道計算結果を Figure 4 に示す。電極のみではドリフトスペースに電場が染み出すことでビームが偏向し、内側の電極に衝突した。カバーを設置することにより、ドリフトスペースへの電場の漏れが無くなり、静電アナライザーの軌道中心に入射できる。また、入射側と同様に射出側にもドリフトスペースが生じる。FC2 の位置を電極射出側に近づけることで、ビーム発散の影響を少なくした。

4. 価数分布取得試験

製作した R25mm の静電アナライザー電極を使用して、グラファイトターゲットにエネルギー45 mJ のレーザー照射により生成したプラズマの価数分析取得試験を行った。電極に±100 V を印加した時の FC2 の波形を Figure 5 に示す。入射側の可変スリット幅は 0.4 mm であり、信号の検出にはアンプ(Phillips Scientific model6931)を使用した。検出時間 13.0 μs、15.6 μs の所にピークが得られた。FC2 を静電アナライザー電極に近づけたため、ターゲットから静電アナライザー一部の FC2 までの距離は 2 m であり、検出時間 t [s] は以下の式で求められる。

$$t \cong 2.24 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{1}{zV}} \quad [\text{s}] \quad (3)$$

よって、これらのピークはそれぞれ、C³⁺及びC²⁺と同等でき、計算式から求めた各価数の検出時間にイオンが検出されたことから、本アナライザー電極でプラズマ中のイオンを設計通りに分析できることを確認した。また、本電極を用い、印加する電圧を変化させて各価数のピーク値をプロットして、価数分布を測定した。得られた結果を Figure 6 に示す。信号強度及び時間は FC1 で得られた信号強度及び位置で校正している。FC2 で得られた各価数の信号強度の合計と全イオン電流である FC1 の波形がほぼ一致することから、生成したプラズマ中のイオンの価数分布を正確に測定できていることが確認できた。また、エネルギー45 mJ では、C³⁺の割合が最も多く、

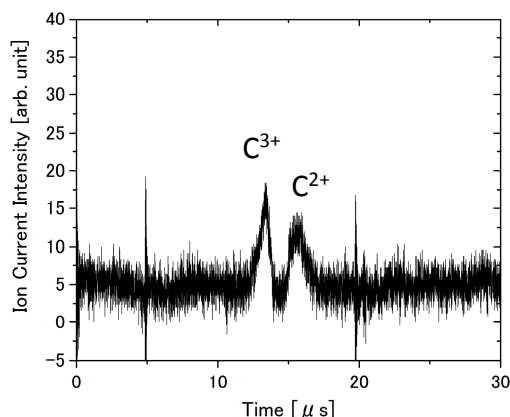


Figure 5: Detected signal of FC2.

C⁺、C²⁺の低価数イオンの生成割合を高めるためにはレーザーエネルギー密度を下げる必要があることが分かった。

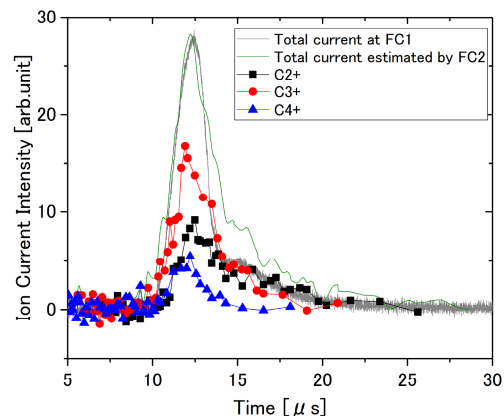


Figure 6: Measurements of the charge state distribution using R25mm electrodes.

5. まとめ及び今後の予定

レーザーイオン源で生成した低速プラズマの価数分析のために、中心軌道半径が 25 mm の小型静電アナライザー電極の設計・製作を行った。炭素プラズマの価数分析試験を行った結果、計算値通りの時間に各価数のイオンが検出されたこと、及び各価数の信号強度波形合計と全イオン電流波形が一致することから、製作した静電アナライザー電極で価数分布測定が行えることを確認した。

今後は、本電極を用い、様々なレーザーのエネルギー密度について生成するプラズマのイオンの価数分布測定を行うことで、低価数イオン生成に最適な条件を検討していく予定である。

参考文献

- [1] Y. Saitoh *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 89, 23 (1994).
- [2] 山田圭介、他 “TIARA イオン注入装置におけるイオン生成方法の開発” JAEA-Technology, 2008-090.
- [3] H. Kashiwagi *et al.*, “レーザーイオン源による炭素プラズマの生成” Abstracts of the 10th Takasaki Advanced Radiation Research Symposium, p103 (2015).