

高出力高強度 Yb レーザーを使ったレーザーイオン源の開発 DEVELOPMENT OF LASER ION SOURCE USING HIGH POWER YB LASER

澁谷達則^{#, A)}, 吉田光宏^{B)}, 林崎規託^{A)}
Tatsunori Shibuya^{#, A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Noriyosu Hayashizaki^{A)}

^{A)} Tokyo Institute of Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In this research, we plan to generate highly charged ions by using the laser that can achieve high repetition. This laser is Ytterbium (Yb) laser that can be driven at high power and high repetition. The method is a previously formed pre-plasma using a Q-switched laser followed by reheating the pre-plasma using high-intensity Yb laser (Double shot method). At present, we have developed high power Yb laser and pre-testing of the ion source using the Nd:YAG laser is required to perform the measurement test described above. These analyzes were performed on tantalum and carbon ions with a valence analysis of 'Time of Flight' method in the pre-test. Additionally, development of Yb laser has already achieved pulse energy of 70mJ. For the next stage, we will develop to generate for highly charged ions to further high power laser.

1. はじめに

重イオン加速施設では、これまで以上に大電流、高価数、低エミッタンスのイオン源が要求されている。ECRIS (Electron Cyclotron Resonance Ion Source) や EBIS (Electron Beam Ion Source) では、40 価を超過する高価数イオンを生成できるが、mA 級の大強度ビームを生成することは原理的に困難である。

レーザーイオン源は、大電流、低エミッタンスではあるが、高価数イオンの生成は30 価程度であることが利用拡大を妨げてきた。しかし、近年、チェコの Laska(A.C.S.R)グループが、高出力であるヨウ素レーザー(波長 1315nm、レーザー出力 800J、パルス幅 400psec、レーザー強度 10^{16}W/cm^2 、繰返し率 5shot/hour)を用いて Au や Ta の高 Z 元素を 50 価以上に電離することに成功した[1]。これらの結果と他のイオン源との最大生成価数を Fig 1 に示した。

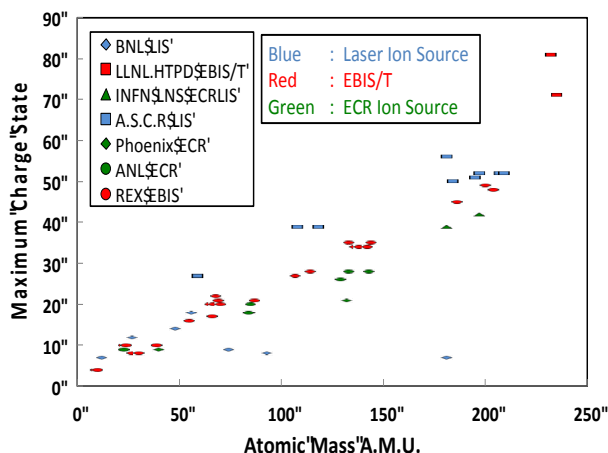


Figure 1: Maximum charge state at ion sources.

[#] shibuya.t.ac@m.titech.ac.jp

Laska らの報告により高価数レーザーイオン源の可能性が示されたが、ヨウ素レーザーでは電力変換効率が悪く、加速器用イオン源に要求される数 Hz 以上の高繰返し率を実現することはできない。このため、高効率高出力のレーザーが必要であり、低量子欠損、直接 LD 励起可能、高濃度添加可能等の利点を有する Yb レーザーが候補に挙げられる。本研究では、この高効率・高強度 Yb レーザーを用いた高価数イオン生成の可能性について検討している。

2. レーザーによる多価イオン生成

2.1 基本的原理

高温高密度のレーザープラズマにおける原子過程には、代表的なものとして電離、再結合、励起、脱励起過程が存在する。これらのうち、電離過程に関しては、光直接電離と電子衝突電離とに大別することができ、従来法のレーザーイオン源の適用範囲であるレーザー集光強度 10^{14}W/cm^2 以下では多光子吸収過程と古典吸収過程が支配的である。この過程において到達できる電子温度は、数 100~数 1000eV であり、この電子温度によって到達できる最大生成価数は 30~40 価程度と推測される。これは、実験的にも示されており、Pb32 価や Mg11 価の生成が最大であることが報告されている[2]。

近年、レーザー核融合における基礎研究では、CPA(Chirp Pulsed Amplification)法を用いた数 fsec の超短パルスレーザーを用いて 10^{20}W/cm^2 以上のレーザー集光強度が達成され、準単色エネルギー電子ビームの生成[3]に代表されるように多くのプラズマ非線形効果を用いた応用が可能となった。電離現象については、レーザー集光強度が 10^{18}W/cm^2 に達することで、ポンデロモティブ力による相対論的非線形プラズマ波が誘起され、このプラズマ波のポテンシャルに捕獲された電子が加速されることによって電離を促進する。このとき、プラズマ波を誘起す

るために必要な電子密度はレーザーパルス幅 500fsec を用いると 10^{16}cm^{-3} である。また、加速勾配は 1GV/m 程度となり、 $10\mu\text{m}$ 加速されることによって現在の電離エネルギーの限界を超えることができる。加速長 $10\mu\text{m}$ はレイリー長よりも十分に小さく、この程度加速されることは十分可能である。この加速によって生成された高速電子を利用し、30 価を超過する高価数イオンの生成を行う。これらの物理的概念図について Fig 2 に示す。

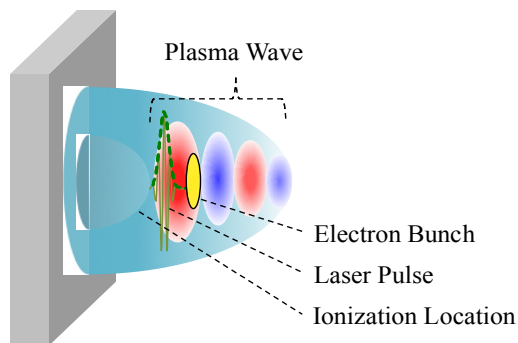


Figure 2: Schematic diagram of laser plasma ionization.

2.2 シミュレーションによる検証

本来、これらの研究にはシミュレーション的アプローチが欠かせないが、電離シミュレーションコードの開発は近年開始されたばかりで実験的アプローチが先行しているのが現状である[4]。これは、原子過程が複雑であることと計算領域が大規模であることに起因している。電離シミュレーションでは、PIC(Particle in Cell)法による計算領域が数 $100\mu\text{m}$ オーダーに制限されることから、レーザーイオン源における $10\sim 300\text{cm}$ 程度のプラズマ輸送過程を大規模に計算することは困難である。現状では、さらなる電離モデルの新鋭化、PIC 法と流体コードや Fokker-Plank コードのハイブリット化による拡張等が必要である。

2.3 実験による検証と本研究の目的

本研究では、超短パルスレーザーによる多価イオン生成の可能性を検証する。そのためには、まず価数分析可能なイオン源のテストベンチの製作および高強度 Yb レーザーの製作が必要である。Yb レーザーでは CPA 法と組み合わせることによってパルスエネルギー 10J、パルス幅 500fsec、中心波長 1030nm、繰返し率 50Hz を目標としている。これによりレーザー集光強度 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度を比較的容易に得ることができる。このレーザーの完成後に多価イオンの生成及び価数分析試験を行い、本スキームの検証を行う予定である。

3. 実験と結果

3.1 イオン分析装置の製作

まず始めに、価数分析が可能なレーザーイオン源のテストベンチ装置を制作した。テストベンチの概念図について Fig 3 に示す。プラズマ膨張による初期速度を利用して Time of Flight 方式による分析方法を採用した。ターゲットには、 ^{12}C と ^{181}Ta を用いて行い、テストベンチ容器内を $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 以下に保って実験を行った。イオン電流量の測定はファラデーカップを用いて行い、価数分析測定では静電アナライザーと MCP(Micro Channel Plate)を用いた。価数分析の際のスリット幅は $50\mu\text{m}$ とした。イオン電流量測定と価数分析測定の際には、その都度測定装置の交換を行った。

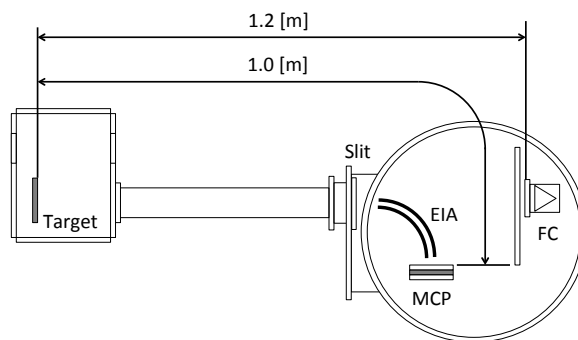


Figure 3: Schematic picture of the experimental.

また、本研究では高強度レーザーによるプラズマ波を生成するが、これにはレーザーパルスが入射する前にプラズマプルームを形成しておく必要がある。このプラズマプルームは他のレーザーによるアブレーションによって生成する。形成されるプラズマは、密度分布を変化させるためプラズマ波を誘起できる密度分布部 (10^{16}cm^{-3}) をピンポイントに照射することは難しい。そのため、プラズマプルーム形成用のレーザーと高強度 Yb レーザーを時間制御して照射できるシステムを構築した。この時間制御した波形の一例を Fig 4 に示した。Fig 4 左図は時間制御を行わず、ターゲット近傍 (誤差 1nsec 未満) で検出した結果である。また、Fig 4 右図は高強度 Yb レーザーを 120nsec (誤差 1nsec 未満) 遅延して照射した際の検出結果である。

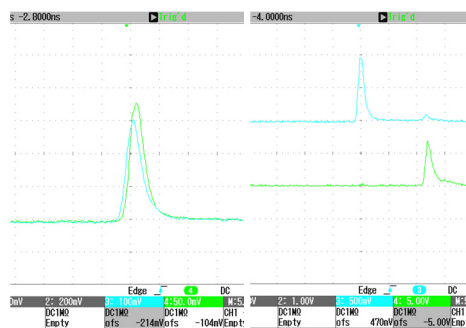


Figure 4: Example of delay time controlling.

3.2 高強度高出力 Yb レーザーの開発

レーザーイオン源が高価数イオンの生成と加速器用のイオン源として必要とされる要求性能について Table 1 に示す。

Table 1: Required Parameter for Generating Highly Charged Ions

| | Minimum Requirement | Yb Laser System |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Laser Intensity $\sim 30^+$ | 10^{11}W/cm^2 | - |
| Laser Intensity $40^+ \sim$ | 10^{16}W/cm^2 | 10^{18}W/cm^2 |
| Repetition Rate | 1 Hz | 50 Hz |

これまで繰返し率の制約から候補となるレーザーは CO_2 レーザー, Nd:glass レーザー, Nd:YAG レーザー, に限られてきた。このうち, CERN レーザーイオン源では, 100J 級の CO_2 レーザーが用いられた [3]。しかし, これらのレーザーでは高いレーザー集光強度を達成することはできない。

近年, Yb レーザーの登場により, 高繰返し率且つ高出力が達成されつつある。本研究で使用する Yb レーザーにおいても Yb ファイバーレーザー部では, 平均出力 20W を達成している。我々はレーザーイオン源用に Yb レーザーを開発しており, その全体構成について Fig 5 に簡略的に記した。

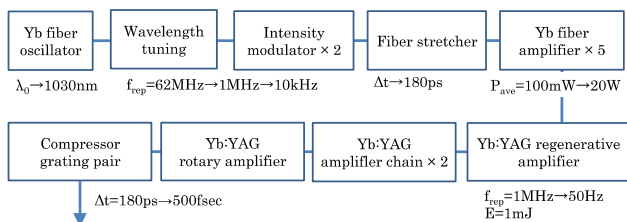


Figure 5: Schematic layout of Yb laser system.

現在では, Yb:YAG amplifier 部において 70mJ を達成している。また, さらなる高出力化のために Yb:YAG rotary amplifier の開発を行っている。後段には, CPA によるパルス圧縮を行う予定である。現在の達成値と目標値について以下に詳細を示す [4]。

Table 2: Present and Goal Laser Parameters

| | Yb Fiber | Yb:YAG | Goal |
|-----------------|------------------|---------|----------|
| Pulse energy | 13 μJ | 70 mJ | 10 J |
| Repetition rate | 1 MHz | 3 Hz | 50 Hz |
| Average power | 20.9 W | 210 mW | 500 W |
| Pulse duration | 180 psec | 90 psec | 500 fsec |
| Wavelength | 1032 nm | 1030 nm | 1030 nm |

3.3 イオン源テストベンチの動作試験

本研究では, 各計測装置を製作した。本研究に置

ける測定は, ファラデーカップを用いた電流計測と Time-of-flight method と用いた価数分析を高強度 Yb レーザー完成前に動作試験として行った。レーザーには一般的な Q スイッチレーザーである Nd:YAG レーザー ($\lambda = 1064 \text{nm}$, 650mJ, 10nsec) を用いた。 ^{12}C と ^{181}Ta を用いて実験について Fig 6 に示す。現在は, ^{12}C 6 価及び ^{181}Ta 8 価の生成に至っている。

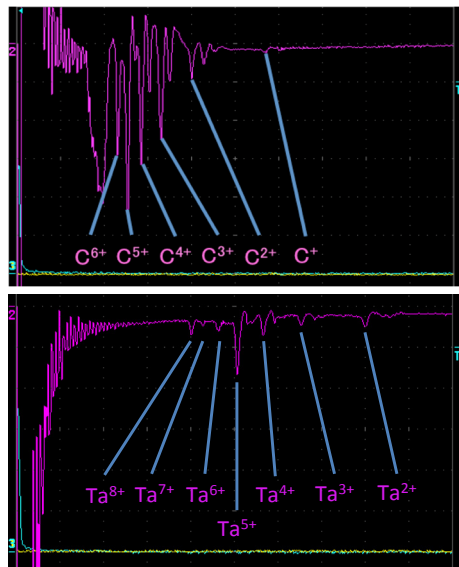


Figure 6: Time of flight spectrum at carbon and tantalum.

4. まとめ

重イオン加速における質量電荷比の向上は, 高 Z 元素の加速ほど重要性である。高 Z 元素は常温で固体の物質が多く, レーザーイオン源の使用が可能である。このレーザーイオン源は大電流且つ低エミッタンスであるが, 生成できる価数に制限が存在する。これは, 高強度レーザーによって高価数化できることが示されているが, いまだ加速器用イオン源に要求されるレーザー繰返し率を達成できていない。これらのことから, 本研究では高繰返し可能なレーザーによる多価イオン生成の検証を行っている。

参考文献

- [1] L. Laska, K. Jungwirth et al., "Charge-state and energy enhancement of laser-produced ions due to nonlinear processes in performed plasma", Appl. Phys. Lett. 86, 081502 (2005).
- [2] CERN. "The CERN Laser Ion Source". Last updated 01/17/2005 <http://scrivens.web.cern.ch/scrivens/lis/home.html> Access date 10/06/2014.
- [3] S.P.D. Mangles et al., "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions", Nature 431. 535-538 (2004).
- [4] Y.Kishimoto., J. Plasma Fusion Res Vol84, No 8. 484-491 (2008).
- [5] Y.Matsumura et al., "Development of Yb laser for high power ultra-short pulse", PAC' 2013.