

電子ビームイオン源のパルス運転 による出力強度変化について

中村信行研究室 高岡竜嗣

1 序論

1.1 多価イオン

多価イオンとは、一般的に2価以上の正または負のイオンのことであるが、原子物理学においては中性原子から多くの電子を取り去った正のイオンを指すことが多い。原子から電子を引き離すには、その束縛エネルギーと同じだけのエネルギーが必要であり、加えて内殻の電子ほど必要なエネルギーは大きくなる。ゆえに結果として生成される多価イオンは電離させた電子の束縛エネルギーの総和だけポテンシャルエネルギーを持っており、価数が高くなるほどそのエネルギー量は膨大である。また、多価イオンは同じ元素であっても価数を変えると発光スペクトルも変化する性質を持ち、遷移の種類も数多く存在するため、多様なスペクトル線を持つことが知られている。

1.1.1 多価イオン源

多価イオンを生成するためには原子に束縛されている電子にエネルギーを与えて電離させる必要がある。今現在、低速多価イオンを生成するための装置として広く利用されているものは2種類存在し、電子サイクロトロン共鳴イオン源 (Electron Cyclotron Resonance Ion Source : ECRIS) と電子ビームイオン源 (Electron Beam Ion Source : EBIS) がある。本実験で扱うのは後者の EBIS である。図1に EBIS の概略図を示す。

EBIS は基本的にイオントラップ、電子銃、及びコレクター部から構成されている。イオントラップの内部には、ドリフトチューブ (DT) と呼ばれる円筒電極が3つ以上ある。そして DT による井戸型

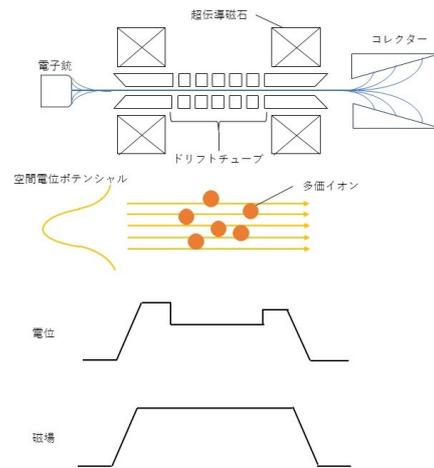


図1 EBIS の概略図

ポテンシャルと、超伝導コイルで圧縮した電子ビームによって発生する空間電荷を利用してイオンをトラップする仕組みである。そしてトラップされたイオンにその電子ビームを照射して逐次電離を行うことで、多価イオンを生成する。

1.1.2 パルス運転

本研究の実験装置である多価イオン照射装置には Kobe-EBIS を使用している。Kobe-EBIS は多価イオンと固体表面の相互作用の研究を目的として、2005年に神戸大学にて製作された。Kobe-EBIS は先述の通り、電子銃から電子ビームを引き出して、井戸型ポテンシャル内にトラップした原子に衝突エネルギーを与えることでイオン化する仕組みであるが、運用の際は多価イオン生成効率向上のため、電子ビームをパルス運転している。その理由は電子ビームを OFF にする際に、空間電荷によってトラップされていた目的外の不要なイオンが追い出さ

れることで、高価数イオンをトラップ内に蓄積できる状態に戻すためである [1]。

1.2 研究目的

多価イオンはポテンシャルエネルギーが低価数のイオンや中性原子に比べて非常に高いため、固体表面に照射することで特異な反応を示す。Kobe-EBIS を用いた多価イオン照射装置はこの分野の研究をさらに先へ進める可能性のある極めて希少な装置である。従って、本研究では Kobe-EBIS が電子ビームのパルス運転の周期によって観測される多価イオンの電流値が変化することに着目し、パルスの周期や OFF にする時間に対するイオン電流値の測定および比較を行い、最も効率的に装置を運転できるパルス運転の設定を解明することを目的とする。

2 実験

2.1 実験装置

本実験で使用した多価イオン照射装置の全体図を図 2[2] に示す。

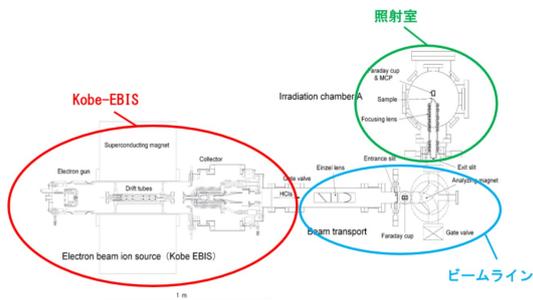


図 2 多価イオン照射装置の概要図 [2]

装置は大きく分けて 3 つの部分で構成されている。多価イオンを生成する電子ビームイオン源である Kobe-EBIS、生成された多価イオンの収束及び価数の調整を行うことでビームとして引き出し照射室まで輸送するビームライン、多価イオンを固体表面へ照射してその反応を観測することができる照射室である。

2.2 実験方法

Kobe-EBIS の電子ビームをパルス運転することによって、多価イオンビームの出力がどのように変

化するのかを観測するため、いくつかの条件でイオン電流値の測定実験を行った。今回使用した気体試料はアルゴンであり、価数選別によって 16 価、11 価、6 価の 3 つの多価イオンを引き出し、それぞれのイオンでパルス運転による出力変化を記録した。また、パルス運転は任意波形発生器の数値を設定することで、1s, 2s, 5s, 10s, 20s の 5 つの周期で実験を行った。ただし、電子ビームを OFF にする時間はすべての周期で 1ms とした。

3 結果及び考察

3.1 時間に対するイオン強度特性

3.1.1 16 価アルゴン多価イオン

16 価アルゴン多価イオンについて、パルス周期 1s、5s、20s の際の時間-イオン電流値のグラフを図 3~図 5 に示す。これらの図を見ると、あるタイミングでイオン電流が急激に上昇して極大となった後、すぐに低下し始めており、その傾向を 1 周期ごとに繰り返していることが分かる。また、図 5 から、電子ビームが OFF になる少し前からイオン電流値の減少が緩やかになり、およそ 6.5pA に漸近していることが見て取れる。これは電子ビームを連続運転した際のイオン電流値と近似できると考えられ、連続的に運転した際にトラップされた目的外のイオンの増加によって多価イオンの生成効率が低下してしまい、パルス運転がより効率的な運転方法で

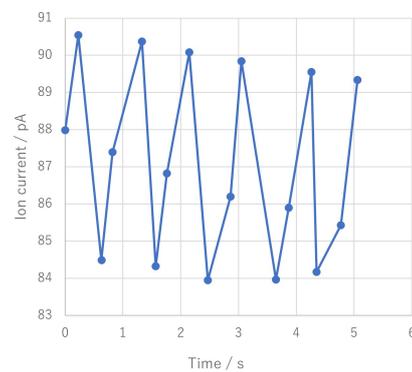


図 3 16 価アルゴン多価イオンの時間-イオン強度特性 (周期:1s)

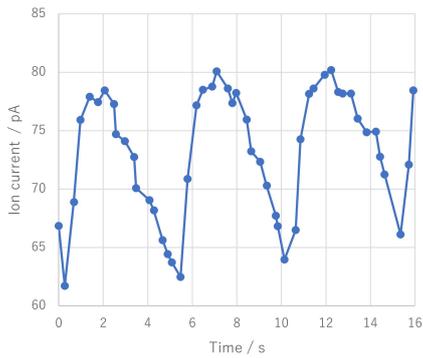


図4 16価アルゴン多価イオンの時間-イオン強度特性 (周期:5s)

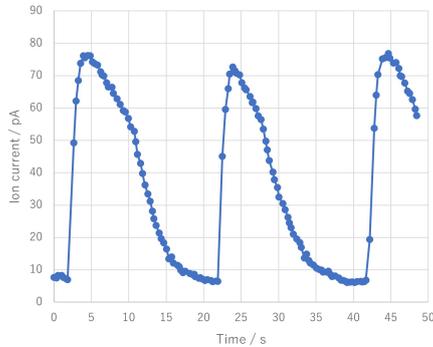


図5 16価アルゴン多価イオンの時間-イオン強度特性 (周期:20s)

あることを示唆している。さらに、周期が短いほど1周期内での電流値変化の幅が小さく、より高い出力を維持している時間が多いことが見て取れ、パルス周期1sが最も生産効率の高い運転方法であると考察できる。加えてこれらの傾向は11、6価アルゴン多価イオンの場合でも現れ、3種類の価数とも非常に近い傾向を観測することができた。

示された波形の最大値を見ると、周期が短いほど大きい値まで電流が上昇していることが分かる。この結果については、高価数のイオンほど磁場や円筒電極から受けるポテンシャルが深いため、電子ビームがOFFの間も多価イオンは完全に追い出されることなくイオントラップ内に残る。つまり周期が短いほど、ONの際にトラップ内の不純物イオンは無いがアルゴン多価イオンは多く存在するという状態で開始されるからではないかと考察する。

3.1.2 11価と6価のアルゴン多価イオン

比較のため11、6価アルゴン多価イオンについて、パルス周期を20sにした際の時間-イオン電流値のグラフを図6、図7に示す。

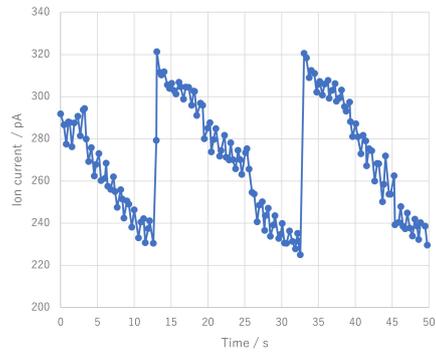


図6 11価アルゴン多価イオンの時間-イオン強度特性 (周期:20s)

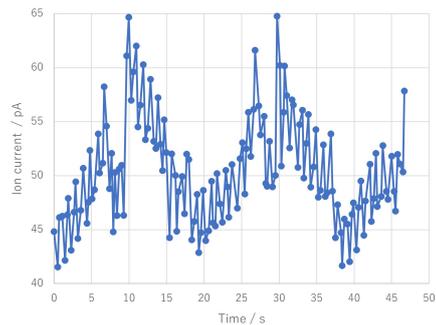


図7 6価アルゴン多価イオンの時間-イオン強度特性 (周期:20s)

これらの図を見ると、16価の場合では直線的に変化していたのに対して、11価や6価では細かな電流値の増減が続く傾向があることが分かる。この結果についても、多価イオンが磁場や電子ビームの空間電荷から受けるポテンシャルエネルギーの差が関係しており、価数の低いイオンほどよりポテンシャル障壁を超える可能性が高いために出力が不安定になると推測する。

3.2 パルス周期に対する時間平均イオン強度

これまでに得たグラフから、それぞれの価数イオン及びパルス周期について時間平均イオン電流値を

求めた。3つの価数それぞれに対して、パルス周期に対する時間平均イオン強度特性を表すグラフを図8～図10に示す。これらの図から、実験したどの価数においても周期が長くなるほど時間平均イオン強度が低くなる傾向にあり、20sよりも周期が長い場合についても、低下が続いていくと推測出来る。加えて3つのグラフを比較すると、パルス周期時間の増加に対する時間平均イオン強度の低下率は16価が圧倒的に大きいことが観測できた。加えて、周期が長い場合ほど電子ビームを連続的に運転した場合のイオン強度に近いと言える。従って、パルス運転によるイオン生成効率の向上はより高価数のイオンほど効果が大きいものであると判断できる。

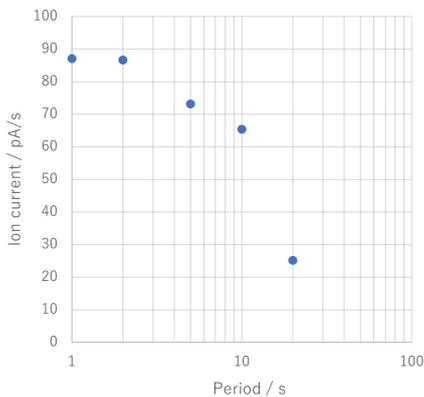


図8 16価アルゴン多価イオンのパルス周期-時間平均イオン強度特性

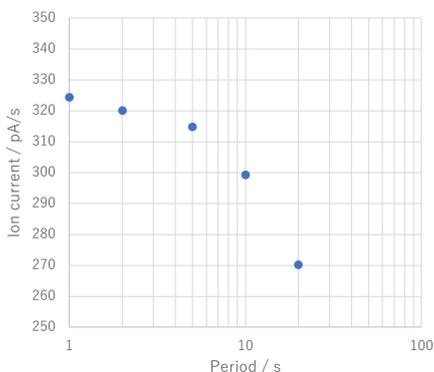


図9 11価アルゴン多価イオンのパルス周期-時間平均イオン強度特性

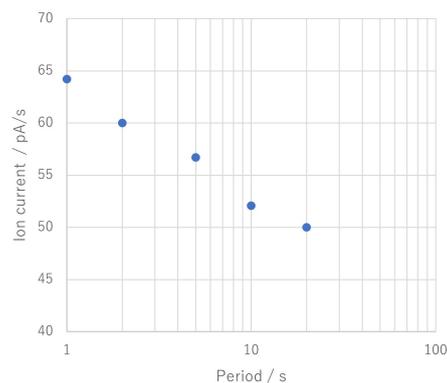


図10 6価アルゴン多価イオンのパルス周期-時間平均イオン強度特性

4 結論

本研究では多価イオンと固体表面間の相互作用研究の目的で開発された多価イオン源である Kobe-EBIS について、電子ビームをパルス運転した際のアルゴン多価イオンの出力変化の観測を目的として実験を行った。結果としてパルス周期 1s 以降は周期が長いほど時間平均出力が低下すること、周期が 20 秒を超えるとピークに比べて非常に低い電流値に漸近していくことが分かった。加えて、最も高価数である 16 価のアルゴンイオンが、周期を伸ばした際の時間平均イオン強度の低下の割合が最も大きいため、より高価数なイオンほど電子ビームのパルス運転が効率的な運転方法になると実証することができた。

一方で、本実験では短いパルス周期の際に 1 周期あたりのデータ数が少なく、詳細な波形を記録することができなかった。従ってより詳細に多価イオンの出力変化を記録できる方法を探し、さらに短いパルス周期にした場合などの多価イオン強度も調べていくことが今後の課題である。

参考文献

- [1] 櫻井誠・大谷俊介・坂上裕之 電子ビーム多価イオン源の特性 J. Vac. Soc. Jpn.
- [2] 早乙女京吾 修士論文 電気通信大学 (2022)