

極短パルスレーザーを用いた高周波同期型レーザーイオン源

RF SYNCHRONIZED LASER ION SOURCE USING ULTRA SHORT PULSE LASER

宮脇瑛介^{#, A)}, 不破康裕^{B)}, 頓宮拓^{A)}, 岩下芳久^{A)}, 井上峻介^{A)}, 中宮義英^{A)}, 橋田昌樹^{A)}, 阪部周二^{A)}

Eisuke Miyawaki^{#, A)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}, Hiromu Tongu^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Shunsuke Inoue^{A)},

Yoshihide Nakamiya^{A)}, Masaki Hashida^{A)}, Shuji Sakabe^{A)}

^{A)} Kyoto University Institute for Chemical Research

^{B)} Kyoto University Research Reactor Institute

Abstract

We are developing a laser ion sources. The repetitive ultrashort laser pulses can generate a microbunch train of short ion-pulses. In order to estimate the density of H₂ gas for the ion sources, which is an important parameter, average gas flow rates have been measured with various parameters such as the pulse width.

1. はじめに

1.1 研究背景

加速器は原子核実験推進のため発明され、以来、素粒子・原子核実験を支える重要な装置として発展してきた。近年ではイオン加速器は物質・生命科学研究に利用される中性子源の一次ビーム生成や粒子線がん治療などにおいて利用が広がり、社会にとって欠くことのできない装置となっている。その利用は今後さらに広がっていくことが予想され、従来のような大型かつ複雑な構成を持つシステムから、よりシンプルで扱いやすい汎用型の加速器への展開、発展が必要である。

イオン加速器の前段加速部に RFQ(Radio Frequency Quadrupole)を用いることが現在の主流となっている。RFQ は radial-matching section、shaper section、gentle-buncher section、accelerator section と呼ばれる 4 つの機能部分からなっており、この構造例を Figure 1 に示す[1]。一般的なイオン源ではバンチ化されていないビームが生成されるので、ビームは shaper section でバンチ化が始まり gentle-buncher section でビームを断熱的にバンチ化し、加速が行われる。ここでバンチングセクションは RFQ 全体の多くの部分を占めているので、もし RFQ 入射部でイオンがすでにバンチ化されていればバンチングセクションが不要となり、RFQ 加速器における加速効率の向上や RFQ の小型化が見込まれる。そこで我々はパルス幅が fs 程度の極短パルスレーザーを照射することで ns 程度の時間構造をもったイオンを生成することを試みた。

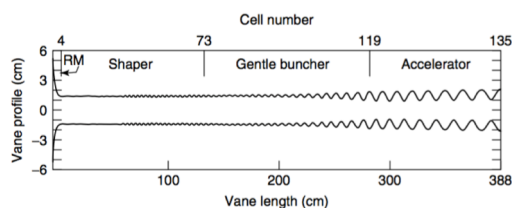


Figure 1: Schematic drawing of the pole tips of an RFQ with adiabatic bunching[1].

[#] miyawaki@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

1.2 マイクロバンチ生成実験

マイクロバンチ生成の実証を行った。実験装置の構成を Figure 2 に示す。また Cavity の加速ギャップ付近の構成を Figure 3 に示す。

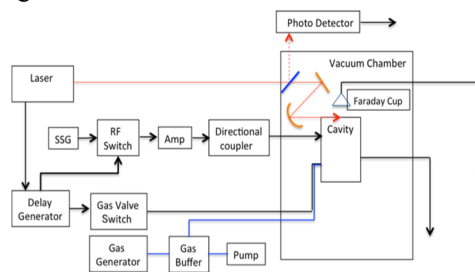


Figure 2: The set up of microbunch generation experiment.

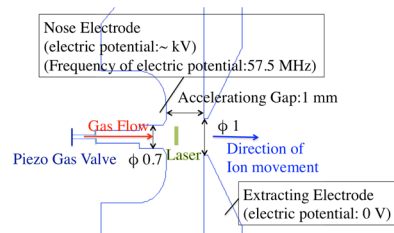


Figure 3: Structure around accelerating gap.

セットアップの詳細はイオン生成実験[2]と同様であるが、変更したパラメータとしては

- レーザーのエネルギーは 234 μJ (レーザー強度で 10¹⁵ W/cm² 程度)
- Cavity の共振周波数は 57.5 MHz
- ファラデーカップと加速ギャップ出口までの距離は 13 mm

である。レーザーと RF 電場の同期を取らずにレーザーを照射し、RF 波形とレーザーパルスの時間差計測データからレーザー入射時の RF 加速位相を求め加速位相順に並べることにより、検出された電流を時間と RF 位相で等高線プロットしたのが Figure 4 である。縦軸はレーザー照射時の位相であり、cos 型で表している。横軸はレーザー照射時刻からの経過時間である。電流値は色で示されており、赤色が正の電流青色が負の電流を表している。

電子の質量は非常に軽いためプラズマから生成された電子は加速位相において早い時間で検出される。したがって \sim ns の時間で位相が -90° から 90° において検出されている負のイオンは電子であると考えられる。

一方、10 ns から 20 ns で位相が -80° から 60° において観測される正の電流はイオンであると考えられる。

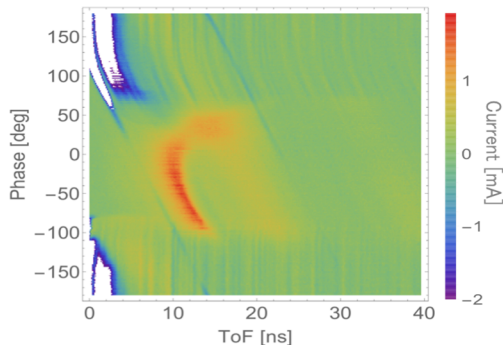


Figure 4: The contour plot of current signals for various initial phases.

これらからショートパルスの単マイクロバンチのイオンが生成可能であることが分かった。しかし、イオン温度やエミッタンス、ガス密度など重要なパラメーターが測定できていない。今回は、ガス密度測定に着目した。ガス密度の測定方法としては干渉法や散乱法など様々あるが、適用可能オーダー範囲が異なる。したがってまずガス流量の測定を行うことでガス密度の推定をすることが必要である。ガス流量の測定を行なった。

2. ガス流量測定

ガス密度の測定の前段階として、ガス流量の測定を行なった。実験装置の構成を Figure 5 に示す。Gas Buffer 内の真空を引いたのちに、Gas Generator で生成したガスを貯める。水素ガスは高速 Gas Valve によって CW もしくはパルスで供給することができる。パルスは Function Generator でパルス幅と繰り返し周波数を調整することができる。Gas Buffer から Mass Flow Meter を通して Cavity にガスが供給される。Mass Flow Meter は、Alicat 社製のマスフローメータ M-50SCCM-D を用いた。このマスフローメータの測定範囲は 0.1 SCCM から 62.4 SCCM までであり、測定誤差は(測定流量の 0.8%) + 0.1 SCCM である。

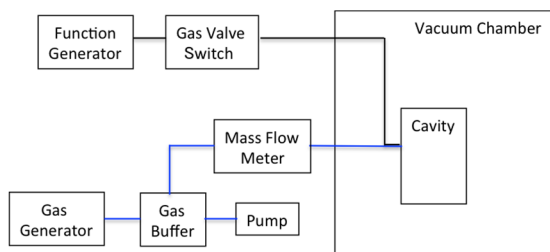


Figure 5: Set up of Gas Flow Measurement.

2.1 繰り返し位周波数依存性

Buffer 内の圧力が 600 hPa, 800 hPa の場合における繰り返し周波数と平均ガス流量の関係を測定した(Figure 6, Figure 7)。なお、Mass Flow Meter で測定した上流圧

はそれぞれ 639 hPa と 864 hPa であった。また繰り返し周波数が 1 Hz の時に平均ガス流量が 1 SCCM を上回るように、バルブスイッチのパルス幅はそれぞれ 10 ms, 5 ms とした。

それぞれの測定結果に関して繰り返し周波数と平均流量を 1 次関数でフィッティングしたところ、639 hPa に関しては 25 Hz, 864 hPa に関しては 28 Hz まではよくフィッティングできた。これをそれぞれの線形限界と呼ぶ。

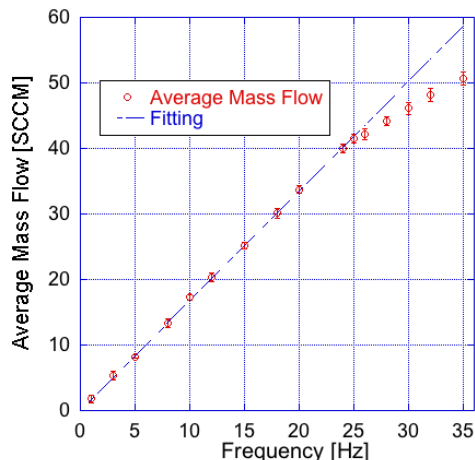


Figure 6: Relationship between frequency and average mass flow at a backing pressure 639 hPa.

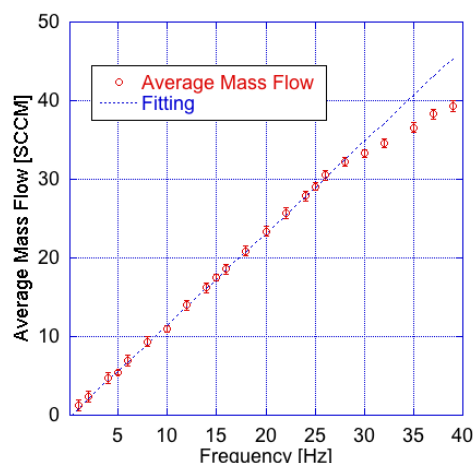


Figure 7: Relationship between frequency and average mass flow at a backing pressure: 864 hPa.

周波数が 28 Hz, 25 Hz は 1 周期 35.7 ms, 40 ms であり、このときのそれぞれのパルス幅は 5 ms, 10 ms である。したがってそれぞれの線形限界において Function Generator が信号を出していない時間は 1 周期あたりそれぞれ 30.7 ms, 30 ms である。この原因はガス供給ユニットとバルブまでが細く長い(内径 1 mm, 長さ数 m)テフロンチューブで繋がっており、このコンダクタンスが無視できなくなるか、ガスバルブが閉じる時定数やガスバルブが振動しているために、バルブが閉じ切るまでに 30 ms 程度かかるのではないかと考えているがより詳細な調査が必要である。

2.2 Buffer 内圧力依存性

マイクロバンチ生成実験条件と同じ繰り返し周波数 5 Hz における Buffer 内圧力と平均流量ガス流量の関係を測定した(Figure 8)。ここでパルス幅は 20 ms とした。この場合には上流圧と平均ガス流量の間には 1 次よりも 2 次でよくフィッティングできた。このことからコンダクタンスは圧力に比例しているようだが、なぜコンダクタンスが圧力に比例しているかについては現在考察中である。

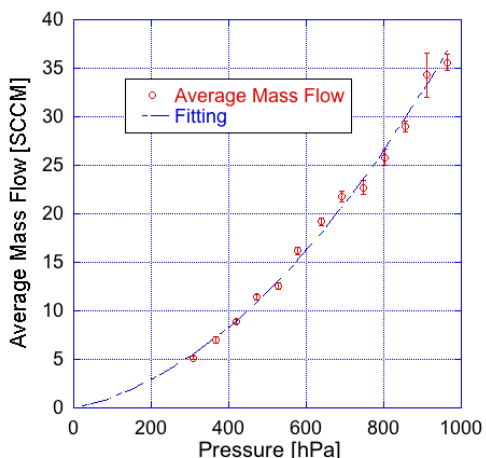


Figure 8: Relationship between pressure and average mass flow.

2.3 ガス流量の推定

パルス幅と平均ガス流量の関係を測定した(Figure 9)。マイクロバンチ生成実験条件においてガスのパルス幅は 1 ms でありこの間のガス流量が推定したいので、できるだけ短いパルス幅でも測定が出来るようにガス上流圧を最大の 964 hPa にした。また、繰り返し周波数についても 2.2 節での推測から次のバルブが閉じ切ったと考えられるが流量が大きくなるように 30 Hz で測定を行なった。ここでバルブ駆動回路の信号は Figure 10 のようであった。この信号において立ち下がりから立ち上がりまでの 176 μ s の間、ガスバルブが開いていることを表している。

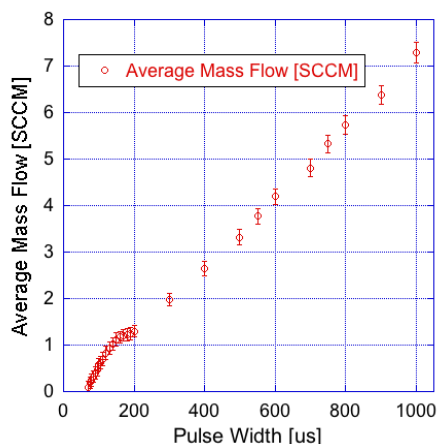


Figure 9: Relationship between pulse width and average mass flow.

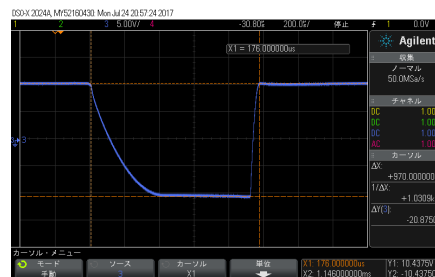


Figure 10: Signal of valve drive circuit.

Figure 9 から各パルス幅における平均流量の差分を各パルス幅の間隔と周波数の積で割ることでガス流量の時間変化を見積もった。時間変化の波形はガスの上流圧に依らないと仮定して、この時間変化と Figure 8 の結果からスケーリングを行うことで Gas Buffer 内の圧力が 400 hPa ガス流量の推定を行なった(Figure 11)。マイクロバンチ生成実験においてはガスパルスのタイミングを数十 μ s 早くすればギャップ間で放電することがわかっており、これはガス密度が高すぎるためと考えられる。したがってガスバルブを開いてから 100 μ s 以内の領域のガスを用いており、ガス流量はピーク値である 120 SCCM の半分以下程度であると推定される。

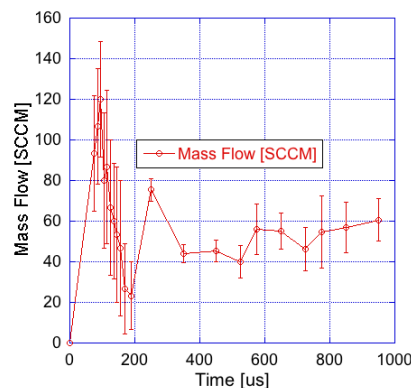


Figure 11: Estimation of the mass flow at a backing pressure 419 hPa.

3. まとめ

現在開発中のレーザーイオン源において、様々な未測定のパラメータからガス密度に着目して、ガス流量の測定を行った。ガス流量とパルス幅、Buffer 内圧力、繰り返し周波数の関係を調べることで現在の実験パラメータにおけるガス流量の時間変化を見積もった。ガスバルブの応答や上流圧とガス流量の関係など詳細な調査が必要な点があるものの、ガス流量の時間変化が推定された。

参考文献

- [1] Thomas P. Wangler. RF Linear Accelerators. Wiley-VCH, 2nd, completely revised and enlarged edition, 2008.
- [2] Y. Fuwa, Y. Iwashita, H. Tongu, S. Inoue, M. Hashida, S. Sakabe, M. Okamura, A. Yamazaki, "RF synchronized short pulse laser ion source", Review of Scientific Instruments **87**,02A911(2016).