

短パルスレーザーイオン源の開発 DEVELOPMENT OF SHORT PULSE LASER OF ION SOURCE AT RCNP

橘高正樹^{*,A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 斎藤高嶺^{A)}, 田村仁志^{A)}, 安田裕介^{A)},
原隆文^{A)}, 荘俊謙^{A)}, ZHAO HANG^{A)}, 松井昇大朗^{A)}, 井村友紀^{A)}, 渡辺薫^{A)},
岩下芳久^{B)}, 山崎淳^{C)}, 不破康裕^{D)}

Masaki Kittaka^{*,A)}, Mitsuhiko Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)},
Takane Saitou^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Yusuke Yasuda^{A)}, Takafumi Hara^{A)},
Tsun Him Chong^{A)}, Hang Zhao^{A)}, Shotaro Matsui^{A)}, Tomoki Imura^{A)},
Kaoru Watanabe^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Atsushi Yamazaki^{C)}, Yasuhiro Fuwa^{D)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University

^{B)} Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI), Kyoto University

^{C)} Nagoya University

^{D)} Japan Proton Accelerator Research Complex / Japan Atomic Energy Agency (J-PARC/JAEA)

Abstract

The Research Center for Nuclear Physics (RCNP) at Osaka University has been developing a short-pulse laser-ion source and producing short-pulse low-emittance beams with the laser-ion source. In recent years, accelerators have been widely used not only for physics research such as particle and nuclear physics experiments, but also for medical and industrial applications such as particle therapy for cancer and detection of soft errors in semiconductors using neutron beams. In order for the accelerator to be widely used in medical and industrial applications, it is necessary to reduce the size and improve the safety and stability of the accelerator. The RCNP has started to develop a short-pulse laser ion source. The short pulse laser ion source is also effective for FLASH irradiation, which has recently attracted attention in particle therapy. There are various development factors for this development, such as a laser synchronized with the RF of the AVF cyclotron and an optimum gas density at the time of laser irradiation. In this presentation, the status of the short pulse laser generation experiment will be reported.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では、短パルスレーザーイオン源の開発及びレーザーイオン源による短パルス低エミッタンスビームの生成に取り組んでいる。近年、加速器は素粒子・核物理学実験といった物理学研究だけでなく、癌に対する粒子線治療や中性子ビームを用いた半導体のソフトエラーの検出など医療・産業分野にも広く利用されている。この加速器の医療・産業利用が普及するためには小型化および安全性・安定性の向上が求められている。この加速器運用の安全性向上にあたり、低エミッタンスビームの実現は加速器構成機器の放射化及び熱破損リスクの低減につながる。RCNPでは短パルスレーザーイオン源の開発に着手した。加速器科学では加速中のビーム損失で引き起こされる加速機器の放射化の低減による安全性の向上が重要である。ビームが空間的に小さく収まると、ビーム輸送の際のビーム損失が小さくなる。低エミッタンスビームの開発は、ビーム損失による加速器構成機器の放射化を低減させることに貢献できる。短パルスイオン源は、近年粒子線治療で注目されている FLASH 照射にも有効である。この開発には AVF サイクロトロン の RF と同期するレーザーおよびレーザー照射時の最適ガス密度など、様々な開発要素がある。Figure 1 にレーザーによるイオン生成の概略図が示されている。レーザーをターゲットに照射するこ

とでプラズマが発生し、加速電圧を印加することでイオンが取り出される。レーザーイオン源の特徴としてビームのパルス幅を極端に短くできることが挙げられる。イオンはレーザーがターゲットに照射中にのみ発生するので、非常に短パルスのレーザーを用いることで数 ns と短パルスのビームを生成することが可能になる。加えて、レーザーがターゲットに当たる領域を $10 \mu\text{m}$ 以下にすることで、ビームはパルス幅が短いだけでなく空間的にも小さい低エミッタンスビームを生成することが可能である。

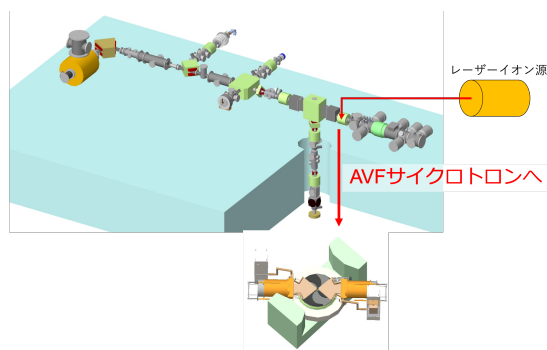


Figure 1: Ions produced by the laser ion source are injected into the AVF cyclotron.

* kittaka@rcnp.osaka-u.ac.jp

2. レーザーイオン源の機器構成

現在想定しているレーザーイオン源の構成機器を Fig. 2 に示す。まず、モード同期レーザーから 40 MHz のパルスレーザーが生成され、AOM を通して、必要なパルスだけを切り出す。この時、AOM の信号はレーザーのパルス周期 40 MHz と AVF サイクロトロン of 加速周波数 18-36 MHz と同期したタイミング信号をピックアップし、それを数 kHz に間引いたものにする。そして、AOM で切り出されたレーザーはアンプとパルスコンプレッサーを通じて、出力を増幅させ、真空槽内のターゲットに照射され、イオンが生成される。この時のレーザーに必要なとされる出力はレーザーパワー密度 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 、パルス幅 40 fs、レーザーエネルギー $< 95 \mu\text{J/Pulse}$ である [1]。レーザーイオン源の構成機器としては

- モード同期レーザー
- AOM (音響光学モジュール)
- アンプ
- パルスコンプレッサー
- 真空槽 (ガス供給系、加速電極)

である。本研究ではこの構成機器のうち、モード同期レーザーの性能試験を行った。

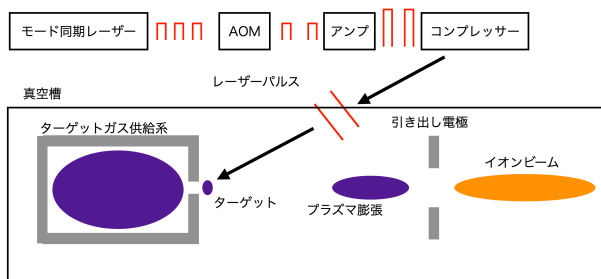


Figure 2: Schematic diagram of ion generation by laser.

3. モード同期ファイバーレーザー

3.1 モード同期

レーザー共振器内には縦モードと呼ばれている波長の異なる光が多数存在している。モード同期とはこの縦モード間の位相が固定されている状態を指す [2]。Figure 3 は、モード同期している共振器内を模式的に表している。モード同期中の共振器内では、各波長の位相の山が揃い、干渉することでパルスが発生する。

3.2 Yb 添加ファイバー

希土類金属であるイットリウム Yb をファイバーのコアにするものが Yb 添加ファイバーである。Yb のエネルギー準位を Fig. 4 に示す [3]。Yb は原子番号 70 の元素であり、 Yb^{3+} イオンのエネルギー準位は非常にシンプルであり、基底状態 $^2F_{7/2}$ と励起状態 $^2F_{5/2}$ の 2 準位しか存在しない。基底状態は 4 つのシュクタル準位で形成され、励起状態は 3 つのシュクタル準位で形成される。

Yb 添加ファイバーの吸収断面積及び放出断面積を Fig. 5 に示す。吸収スペクトルのピークは波長 976 nm

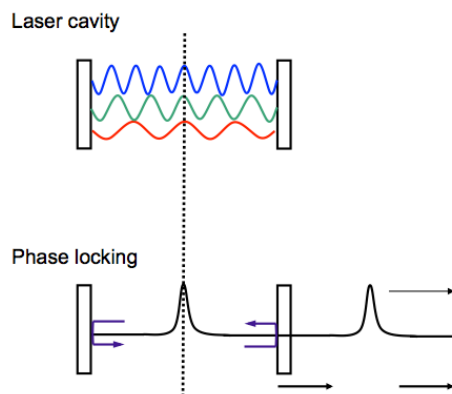


Figure 3: Mode-lock laser.

付近 (A) に存在し、次に波長 915 nm (B) 付近に存在する [4]。波長 976 nm 付近の吸収断面積は波長 915 nm 付近と比べると約 3 倍高く、吸収帯域幅は狭いため、励起効率は高くなる。

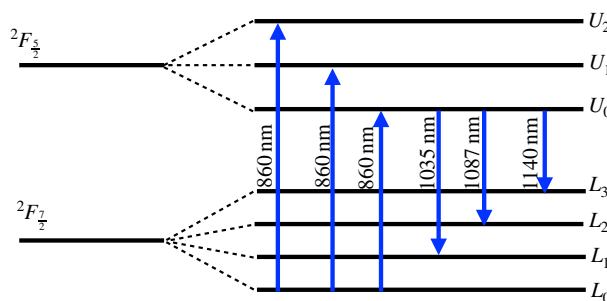


Figure 4: Energy level structure of Yb silica glass.

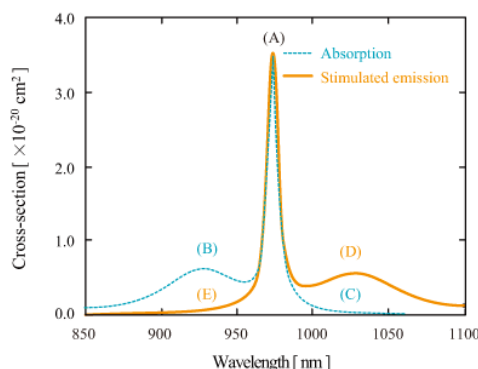


Figure 5: Absorption and induced emission cross sections of Yb fiber.

3.3 非線形偏波回転

ファイバーレーザーのモード同期には Fig. 6 に示すように受動モード同期と能動モード同期の 2 種類がある。本研究では受動モード同期の内の 1 つとしてファイバー

の非線形性を用いた非線形偏波回転法によりレーザーパルスを発生させている [5]。

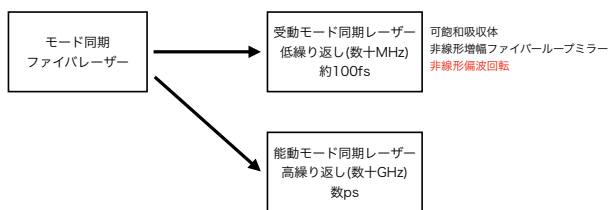


Figure 6: Classification of mode-locked fiber lasers.

ファイバー中に光パルスが伝搬すると、パルスはファイバーの非線形を通して、自己位相変調と相互位相変調により、軸方向で異なる位相変化が生じ、偏光状態が発生する。これは、非線形偏波回転と呼ばれる。この偏光状態を制御することでモード同期を実現する。Figure 7 に非線形偏波回転を用いた Yb 添加ファイバーレーザーを示す [6]。発振波長 976.0 nm の半導体レーザーから出た光はファイバーを伝搬する際に、非線形偏波回転により偏光が変化する。この時の偏光状態を波長板や偏光ビームスプリッター (PBS) で制御する。そして、光強度の強いパルスだけが PBS を通過し、パルスの端あたりの強度の弱い光を通過させないように調整することで、パルスを圧縮する。

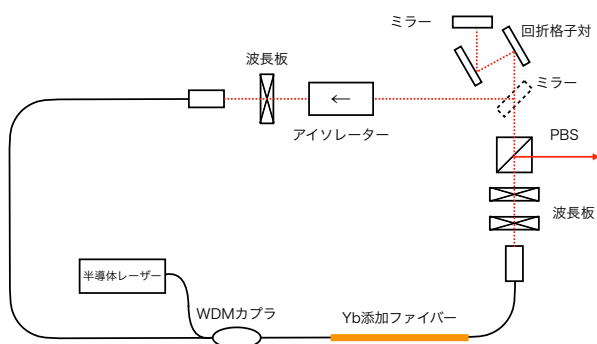


Figure 7: Yb-doped mode-locked fiber laser with nonlinear polarization rotation.

モード同期状態でのレーザーのレーザーパルスの様子を Fig. 8 に示す。パルス間隔が 25 ns で、繰り返し周波数が 40 MHz の安定な発信が得られていることがわかる。出力パルスの平均強度は 0.80 mW である。

4. モード同期レーザーのパルス幅測定

4.1 オートコリレーター

超短レーザーパルスは非常に高速な現象であるので、直接パルス幅を測定することは困難である。本研究では、モード同期ファイバーレーザーで生成したレーザーのパルス幅を計測するために、二光子吸収法のオートコリレーターを使用した。オートコリレーター内のレーザー光路を Fig. 9 に示す。装置内に入射した光はビームスプリッターを透過するパルスと反射するパルスに分割される。分割光の内、一方はミラーが 5 Hz の周期で振動しており、光学距離の調整ができるようになっている。

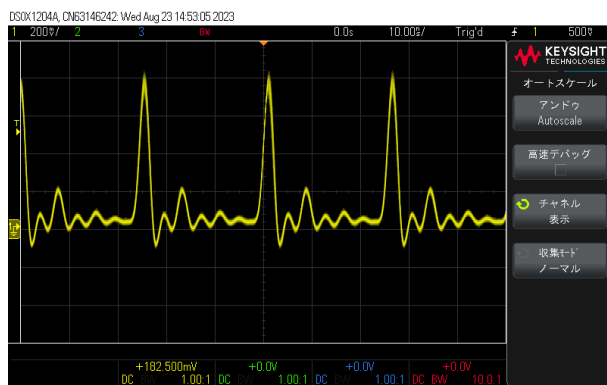


Figure 8: Mode lock laser pulses.

二つの光はビームスプリッターで再結合し、フォトディテクターに集光される。そして、入射した光強度に比例した電気信号が得られる。この電気信号は 2 つのパルスの時間差により変化する。二つの光路長が等しい場合、パルスは時間的に重なり、フォトダイオードに最大限の信号が出力される。パルスの時間的なズレが半波長だけズレた時に最小の信号が検出される。光路差がパルスの全幅を超えて、パルスの重なりがなくなると、干渉が行われなくなり、フォトダイオードの信号はそれらの中間になる。パルスの重なり度合いを変えていき、時間差とフォトダイオード入射光の強さとの関係をプロットしたものを自己相関波形と呼ぶ。この自己相関波形の半値全幅を求めると、レーザーのパルス幅が求められる。

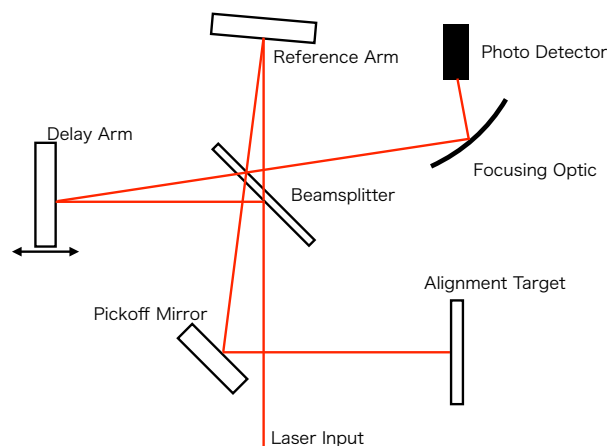


Figure 9: Light path in autocollimator.

4.2 オートコリレーターの使用方法

本研究で使用したオートコリレーターは取扱説明書によると、使用波長は 650~1100 nm、測定パルスは 40 fs ~1 ps とされている。オートコリレーターの前面、側面、背面の外観を Fig. 10 に示す。まず、Delay Output と Photodiode Output につながれた同軸ケーブルをオシロスコープに接続する。そして、前面のレーザー入射窓からレーザーを入射させ、側面のアライメントの中心付近にレーザーがあたるようにレーザ光路を調節する。次にゲインつまみである程度フォトダイオード信号の出

力を出しておいて、オシロスコープにフォトダイオードの信号が出力されていることを確認する。さらに、フォトダイオード位置調整つまみを回して、信号を最大にする。最後に、波形を観測しやすいように Amplitude つまみと Offset つまみを動かして、調整して得られた波形から半値全幅を求める。

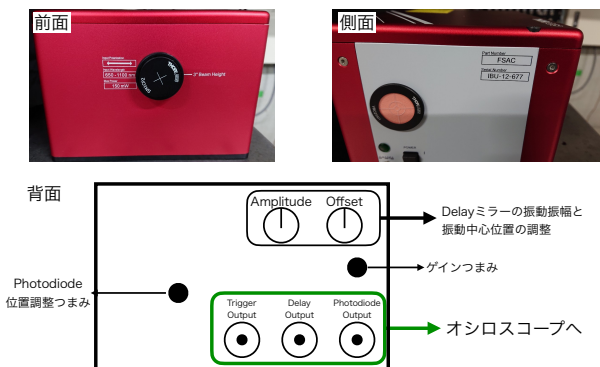


Figure 10: Light path in autocollimator.

5. 実験結果

Yb 添加モード同期ファイバーで生成したパルス光をオートコリレーターで測定した。オートコリレーターのフォトダイオード信号を Fig. 11 に示す。光パルスの時間的な重なりが無い範囲では約 95 mV のが表れており、パルスが時間的に重なる範囲では、最大で 124 mV の信号が検出された。

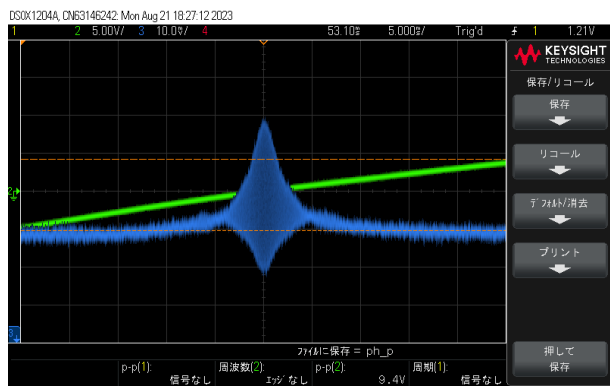


Figure 11: Photodiode signal during mode synchronization.

Figure 11 の中心付近 10 ms の範囲をグラフにしたものが Fig. 12 である。レーザーの波長は 1050 nm なのでフリンジ間隔は

$$\Delta t = \frac{1050 \text{ nm}}{0.3 \mu\text{m}/\text{fs}} = 3.5 \text{ fs}$$

である。Figure 12 より、半値全幅 FWHM の範囲に存在するフリンジ数は 97 であるので、レーザーパルスの FWHM は 340 fs であることがわかる。

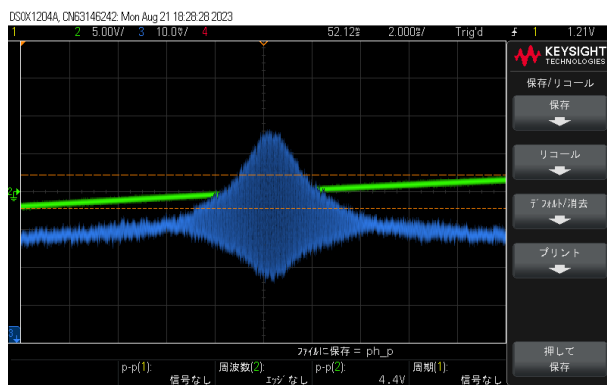


Figure 12: Photodiode signal during mode synchronization.

6. まとめ

現在、サイクロトロンでの精密核物理実験や医療・産業利用のために加速器構成機器の放射化や熱低減が可能な低エミッタンスビームが求められている。レーザーイオン源ならば、レーザーの照射範囲のみにイオンが生成される。さらに、短パルスレーザーを使用することで、空間的にも小さな低エミッタンスビームを生成できる。今回は、レーザーイオン源の構成機器の中でも、モード同期レーザーの性能試験を行い、パルス幅 340 fs、パルスエネルギー 20.0 pJ であることが確認できた。

7. 今後の予定

今後はレーザーのパルス周期 40 MHz とサイクロトロンの加速周期 18-36 MHz との位相同期および、アンプやパルスコンプレッサーの取り付けを行い、レーザーイオン源に必要な出力調整に取り組む。さらに、レーザー照射時のイオンターゲットガスの密度最適化などに取り組み RCNP におけるレーザーイオン源の導入を目指す。

参考文献

- [1] Y. Fuwa *et al.*, “短パルスレーザー生成イオンの RF 同期加速によるイオン源”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan.
- [2] Optimedia 18・3 モード同期ファイバーレーザー, <https://optipedia.info/laser/handbook/laser-handbook-5th-section/18-3/>
- [3] 光響, Yb ファイバーの分光特性 - 吸収断面積と誘導放出断面積, <https://optipedia.info/laser/fiberlaser/yb-emission/>
- [4] 光響, Yb ファイバーレーザー 975 nm / 915 nm 励起の違い, <https://optipedia.info/laser/fiberlaser/yb975-915/>
- [5] 光響, 非線形偏波回転を用いたパルス圧縮, <https://www.symphotony.com/products/ultrashort/ultrashortmenu/npr/>
- [6] 光響製, モード同期 Yb ファイバーレーザーキット, <https://www.symphotony.com/products/ultrashort/fl-mlyb-kit/#section9>