

レーザーコンプトン散乱光源のための 自発共鳴型パルスレーザー増強共振器の開発

DEVELOPMENT OF A SELF-RESONATING PULSED LASER ENHANCEMENT CAVITY FOR LASER-COMPTON SCATTERING LIGHT SOURCES

渡邊一生^{#, A)}, 高橋徹^{A)}, 福島千夏良^{B)}, 小柴裕也^{B)}, 西村拓南^{B)}, 山下洗輝^{B)}, 鷺尾方一^{B)},
荒木栄^{C)}, アリシエフアレキサンダー^{C)}, 福田将史^{C)}, 本田洋介^{C)}, 照沼信浩^{C)}, 大森恒彦^{C)},
ポポフコンスタンティン^{C)}, 浦川順治^{C)}, 上杉祐貴^{D)}, 坂上和之^{E)}, 保坂勇志^{F)}

Issei Watanabe^{#, A)}, Tohru Takahashi^{A)}, Chikara Fukushima^{B)}, Yuya Koshiba^{B)}, Takumi Nishimura^{B)},
Koki Yamashita^{B)}, Masakazu Washio^{B)}, Sakae Araki^{C)}, Aryshev Alexander^{C)}, Masafumi Fukuda^{C)}, Yosuke Honda^{C)},
Nobuhiro Terunuma^{C)}, Tsunehiko Omori^{C)}, Popov Konstantin^{C)}, Junji Urakawa^{C)}, Yuuki Uesugi^{D)},
Kazuyuki Sakaue^{E)}, Yuji Hosaka^{F)}

^{A)} Hiroshima University

^{B)} Waseda University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

^{D)} Tohoku University

^{E)} University of Tokyo

^{F)} National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

We are developing a new type of laser oscillation and storage system for Laser-Compton Scattering (LCS) light sources. By integrating a laser oscillator and enhancement cavity, it is a system in which only light with a wavelength that satisfies the resonance conditions of the enhancement cavity is selectively oscillated and enhanced within the resonator. This optical device is characterized in that active control for maintaining the resonance of the optical storage resonator, which was conventionally required, is not required in principle. Using this optical device, we succeeded in continuous ultrashort pulse oscillation of sub-ps order for about 1 hour. Recently, we are working on stabilizing the temperature with the aim of stabilizing oscillation/storage and reconstructing the optical system, and preparing the X-ray generation experiment.

1. レーザーコンプトン散乱の光源利用

1.1 レーザーコンプトン散乱

レーザーコンプトン散乱(Laser Compton scattering, LCS)とは、相対論的な領域まで加速した電子とレーザー光を衝突により、X線・ γ 線領域の光子を散乱する現象である。概念図を Fig. 1 に示す。例えば、KEK-LUCX における LCS を例にとると、23 MeV の電子に 1.2 eV のレーザー光を衝突させると、エネルギーが約 8 keV 程度の X 線が散乱される。LCS の特徴として、以下の項目が挙げられる。

- エネルギーの変動性がある。
- 準単色性がある。
- 高指向性がある。
- 放射光等と比べて同程度のエネルギーの光子を生成するための必要な電子のエネルギーが低い。

このように様々な特徴を有するため、LCS を用いた光源の開発が活発に行われている [1]。

1.2 LCS の光源利用のための光蓄積共振

LCS の課題は生成光子数の増大である。本研究では光蓄積共振器に超短パルスレーザー光を蓄積することにより、レーザーパルス強度を増大することに

よってこの課題を解決する方法を開発している。

光蓄積共振器にレーザーパルスを蓄積するためには、共鳴条件を満たすように絶えず共振器長を制御する必要がある。過去に、PID 回路を用いて共振器長に換算して約 16 pm の制御を行い、増大率 1200 倍を達成している [2]。しかし、増大率をさらに大きく

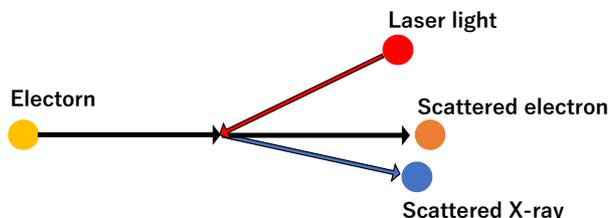


Figure 1: The notion of laser Compton scattering.

[#] iwatanabe@huhep.org

すると、制御が難しくなるという課題があった。この課題を解決するために、自発共鳴型光蓄積共振器と呼ばれるアイデアを導入した。

2. 自発共鳴型光蓄積共振器によるパルスレーザー増強

自発共鳴型光蓄積共振器の概念図を Fig. 2 に示す。このシステムは、光蓄積共振器の共鳴条件を満たす波長の光のみが光蓄積共振器を通過して増幅部に戻ることでレーザー発振する。そのため、共振器長が変化してもその共振器長で決まる新たな共鳴条件を満たす波長の光が光蓄積共振器を通過するため、フィードバックなどの制御を行うことなしに発振を継続することが可能である。これにより、今まで課題となっていた共振器長制御の難しさを原理的に回避できる。これまでに CW 発振で増大率 19 万倍を達成している[3]。

ただし、自発共鳴型光蓄積共振器でパルスを蓄積するためには、共振器内に蓄積されているパルスとループを周回するパルスが共振器において重なり合う必要がある。

$$L_{loop} = 2nL_{cav} \quad (1)$$

この条件に求められる制御精度はパルス幅程度であり、前述の共鳴維持のための共振器長の制御に比べると容易に満たすことができる。

3. 実験セットアップ

自発共鳴型光蓄積共振器によるパルス発振の実験セットアップを Fig. 3 に示す。

3.1 ファイバー増幅部

ファイバー増幅部の構成は、図の左から順番に、ファイバーコリメータ(Fiber Collimator, FC)、Yb 添加ファイバー(Yb fiber, YDF)、波長分割多重コプラ(WDM)、FC で構成されている。YDF の励起光は、波長 976 nm の半導体レーザーを用いており、ポンププロテクター(Pump protector, PP)を介して、WDM へ入力される。

3.2 自由空間

3.2.1 光蓄積共振器

光蓄積共振器はミラー間隔が 420 mm、繰り返し周波数に換算すると、357 MHz となるように設計されている。ミラーはステンレスの筐体にマウントされている。

3.2.2 モードロック機構

モードロックには、ファイバー部で生じた非線形偏波回転を用いている。1/2 波長板、1/4 波長板、偏光ビームスプリッターがモードロック機構に関与している。

3.2.3 空間モードマッチング機構

光蓄積共振器に光を蓄積するためには、レーザー光の空間モードと、共振器ミラーで決まる空間モー

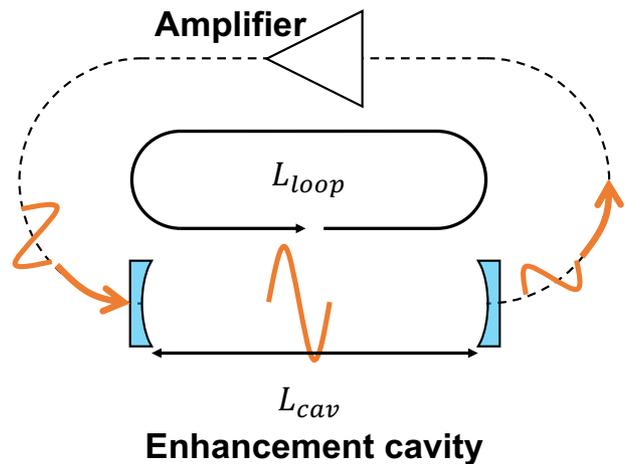


Figure 2: The notion of self-resonating cavity.

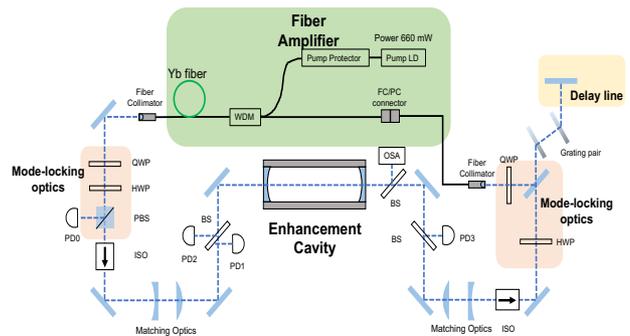


Figure 3: Schematic of experimental setup.

ドが一致する必要がある。凸レンズと凹レンズを組み合わせて、空間モードを共振器に結合させる。

3.2.4 分散補償機構

パルスがファイバー部を伝搬すると、パルスの形状が崩れる。回折格子を用いて分散を調整することにより、パルス形状を整える。

3.2.5 ループ周長調整機構

前述のパルス蓄積条件 Eq. (1)を満たすために、ループ周長を調整する必要がある。ミラーマウントを直動ステージに取り付けることにより、この調整を行う。

4. モードロックパルス発振試験

このセットアップでのモードロックパルス発振試験の結果を述べる。

4.1 時間波形とパルス幅、自己相関波形の様子

はじめに時間波形を Fig. 4 に示す。典型的なモードロックパルス発振時の波形となっている。ピークの間隔は、周波数表記で 358.88 MHz となった。次に、オートコリレーターで測定した自己相関波形を Fig. 5 に示す。自己相関から計算したパルス幅は 347 fs となった。最後に、波長スペクトルを Fig. 6 に示す。広い波長帯でレーザー発振が起こっており、サブピコ秒オーダーの超短パルスであるということと矛盾しない。



Figure 4: Waveform of mode-locked pulse.

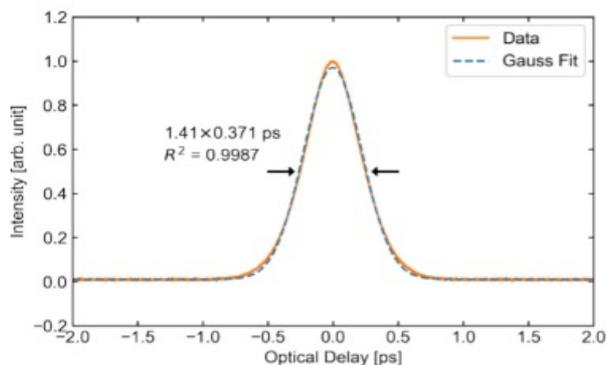


Figure 5: Autocorrelation waveform.

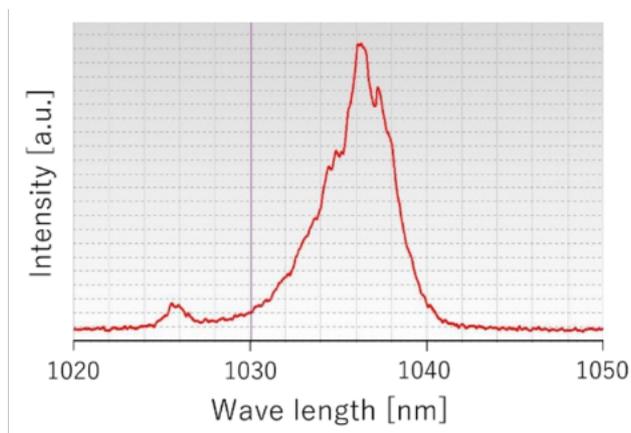


Figure 6: Spectrum of wavelength.

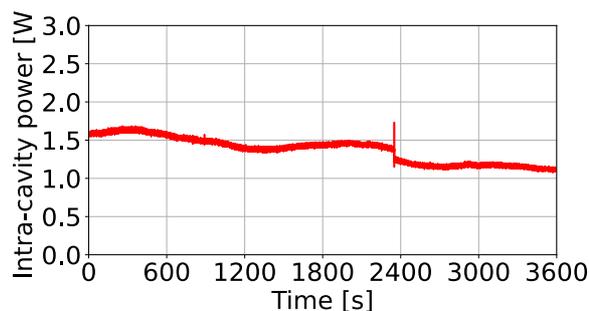


Figure 7: Intra-cavity power measurement over an hour.

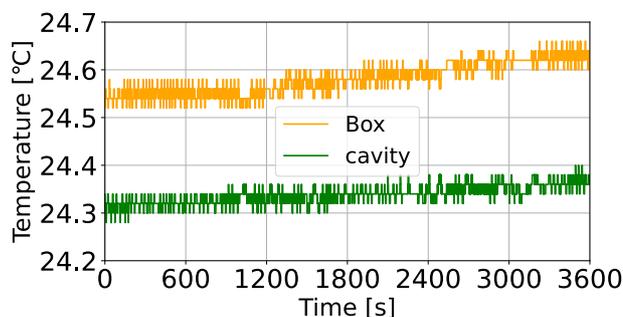


Figure 8: Temperature measurement at optical box and cavity over an hour.

4.2 パワー安定度と温度変化の測定結果

4.1 のモードロックパルス発振の状態、一時間の発振試験を行った。この時の共振器内蓄積光パワーの時間推移を Fig. 7 に示す。蓄積光のパワーは連続的に推移している。また 2400 秒付近で一瞬、発振が途切れているが、アクティブな制御を行うことなく直ぐに復帰している。これは、自発共鳴型パルスレーザー増強共振器が原理通りに動作していることの証拠であると言える[4]。発振が一瞬途切れる前までの蓄積光の平均パワーは 1.34 W、増大率は 78.5 であった。

またこれまでの研究で、このシステムを用いたモードロック発振の安定性には、温度変化が関係しているということがわかってきた[5]。そこで、パルス発振時の光学定盤内と共振器筐体の温度の時間変化に注目した。Figure 8 に温度の測定結果を示す。光学定盤内、共振器筐体ともに温度は上昇している。発振が途中で一瞬途切れたのは、温度変化がある閾値を超えたことが原因であることが示唆される[4]。

5. X線生成実験に向けた計画と現状

4 で述べたように、自発共鳴型パルスレーザー増強共振器による継続的なモードロックパルス発振を実証することができたので、次のステップとして X 線生成実験への準備に取り掛かることにした。X 線生成実験を行うための課題として、主に次の 3 つが挙げられる。

- 数時間オーダーでの安定的なモードロックパル

ス発振の実現するための更なる温度安定化と光学系の再構築。

- 加速器とレーザーの同期。
- レーザーパルスの強度のさらなる増強。

以下では、これらの課題についての取り組みの現状について述べる。

5.1 長時間の安定発振のための温度安定化と光学系の再構築

これまでも温度安定化の取り組みを行ってきたが、4.の発振試験時より安定性を向上するために、実験室に大型のエアコン、ヒーター、パーティション、サーキュレーターを導入を行った。加えて、光学定盤の周りを高性能な断熱材で覆う、共振器筐体に一定温度の恒温水が流れるチューブの巻き付けを行うことにより、光学素子をより高精度で安定化させる取り組みを行った[5]。

以上の取り組みを行った後の温度測定の結果を Fig. 9、また各測定値の最大値と最小値の差を Table 1 に示す。各所の温度変化は非常に小さく抑えることが出来ている。

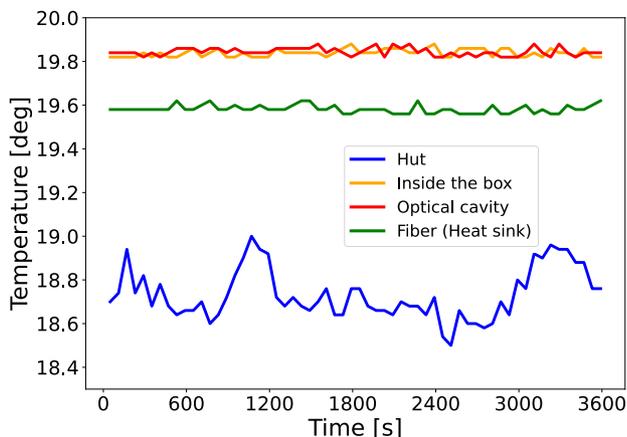


Figure 9: Temperature measurement after effort of stabilization.

Table 1: Difference between Maximum and Minimum Temperatures

Measurement point	MAX-MIN [°C]
Hut	0.50
Inside the box	0.06
Optical cavity	0.06
Fiber	0.06

これらの取り組みを行った影響で、光学系のアライメントが一度崩れた状態となったため、光学系の再構築を実施した。その一環として、ファイバー部の状態の確認を行ったところ、ファイバーをコネクタで接続している部分の端面において、コア部分に大きな損傷が見つかった。スコープで端面を観察し

た様子を Fig. 10 に示す。この損傷箇所については、取り除いた上でコネクタでの接続を廃し、融着による接続に変更を行うことで解決を試みた。

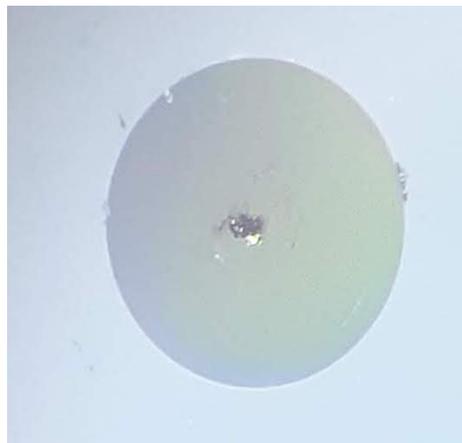


Figure 10: Picture of observed fiber end.

5.2 加速器とレーザーの同期

実際に X 線生成実験を行うためには、加速器とレーザーの繰り返し周波数を同期させる必要がある。我々のグループでは、レーザーパルスを基準信号として加速器を運転する方式を採用した。具体的には、発振器からレーザーパルスの一部を取り出して正弦波の電気信号に変換し、加速器の制御部に基準信号として入力する。この方式は、従来型のレーザー発振器では運転の実績があるが[6]、自発共鳴型パルスレーザ増強共振器では初めての試みである。

この方式での運転を行うためには、レーザーパルスから生成された基準信号の位相、振幅、周波数の安定度が加速器側の要求を満たす必要がある。まず始めの段階として、これらの安定度の測定を行う。

また、自発共鳴型パルスレーザ増強共振器と加速器の制御部は 30-40 m ほど離れており、基準信号の長距離の伝送が必要である。そのため、レーザーパルスを光ケーブルで制御部の直前まで伝送して電気信号に変換するのか、すぐに電気信号に変換して電気ケーブルで制御部まで伝送するのか、どちらの方法のほうが信号の品質を保てるかについても、安定性の測定と併せて行う予定である。

6. まとめ

本研究では、自発共鳴型パルスレーザ増強共振器の開発を行っており、約 1 時間の継続的な発振に成功した。次のステップとして X 線生成実験を行うことを見据え、更なる安定発振のための温度の安定化を含めた光学系の再構築を行った。今後は、加速器との同期運転に向けたテストを行う予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H00691 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] B. Günther *et al.*, J. Synchrotron Radiat. 27(5), 1395–1414 (2020).
- [2] T. Akage *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 623, 576-578 (2010).
- [3] Y. Uesugi *et al.*, APL Photonics 1,026103(2016).
- [4] Y. Koshihara *et al.*, Optical Express Vol. 30, Issue 24, pp. 43888-43899 (2022).
- [5] C. Fukushima *et al.*, “Study on a self-resonating optical cavity for laser-compton scattering”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 478-482.
- [6] M. Fukuda *et al.*, “Development Status and Future Plan of Laser Undulator Compact X-ray Source (LUCX) in KEK” J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 9, No. 3(2012).