

レーザーコンプトン散乱に向けた自発共鳴型光蓄積共振器の開発

STUDY ON A SELF-RESONATING OPTICAL CAVITY FOR LASER-COMPTON SCATTERING

福島千夏良^{#,A)}, 小柴裕也^{A)}, 山下洗輝^{A)}, 鷲尾方一^{A)},
アリシエフ アレキサンダー^{B)}, 浦川順治^{B)}, 大森恒彦^{B)}, 照沼信浩^{B)}, 福田将史^{B)}, 本田洋介^{B)},
ポポフ コンスタンティン^{B)}, 上杉祐貴^{C)}, 坂上和之^{D)}, 高橋徹^{E)}, 保坂勇志^{F)},
Chikara Fukushima^{#,A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Koki Yamashita^{A)}, Masakazu Washio^{A)},
Alexander Aryshev^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Tsunehiko Omori^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Masafumi Fukuda^{B)},
Yosuke Honda^{B)}, Konstantin Popov^{B)}, Yuki Uesugi^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{D)}, Tohru Takahashi^{E)}, Yuji Hosaka^{F)}
A) WISE Waseda Univ, B) KEK, C) IMRAM Tohoku Univ, D) UT-PSC, E) Hiroshima Univ, F) QST

Abstract

Laser Compton Scattering (LCS) is a technique to produce quasi-monochromatic X-rays and gamma rays by colliding a laser with a high-energy electron beam produced by an accelerator. Although LCS light sources are expected to produce photons of the same quality in a small (10m x 10m) device as those from large synchrotron radiation facilities, the low number of scattered photons is an issue for practical use. To solve this problem, we have developed an optical cavity to generate colliding lasers with high repetition rate and high peak power. However, the operation of an optical cavity in an accelerator environment with high noise limits the stored optical power by maintaining resonance through resonator length control. Therefore, we have devised and are developing a self-resonating optical cavity in which the resonance is maintained spontaneously by connecting the optical storage resonator and the laser oscillator in a closed loop. In this talk, I will report on the current status of self-resonating optical cavity and its temperature dependence.

1. レーザーコンプトン散乱と光蓄積共振器

レーザーコンプトン散乱 (LCS: Laser Compton Scattering) とは、加速器によって生成される高エネルギーのパルス電子ビームとパルスレーザーの衝突によって X 線を生成する手法である。LCS 光源は大型放射光施設でのみ可能であったエネルギー可変性や高指向性をもつ高品質な X 線生成を小型装置 (10 m × 10 m 程度) で実現することが期待されている。現状では、既存の大型放射光施設と比較して散乱光輝度が制限されており、実用化に向けて更なる散乱光の高輝度化が必要とされている。LCS における散乱光量は衝突用パルスレーザーの強度および単位時間当たりの衝突回数に比例するため、大強度かつ高繰り返しのパルスレーザーを生成可能な光蓄積共振器の活用が LCS 光源の高輝度化に有用である。Figure 1 に LCS の概略図を示す。

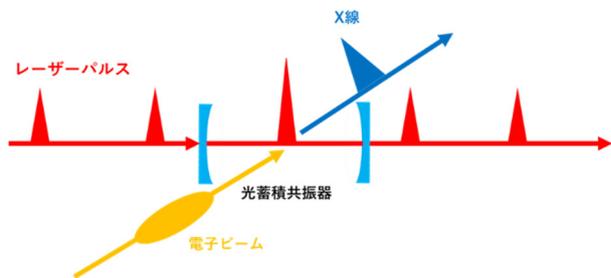


Figure 1: Schematic of Laser-Compton Scattering using an optical cavity.

しかし、加速器施設では環境雑音が大きいため高増大率の光蓄積共振器を共振器長フィードバック制御によって、長時間の共鳴を維持することは困難であり課題となっていた。要求制御精度は pm オーダーの精度が求められる。

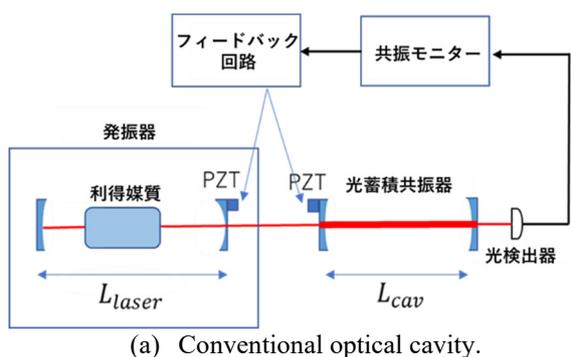
2. 自発共鳴型光蓄積共振器

従来の光蓄積共振器は、発振器からの光を外部の共振器に蓄積し増大する仕組みであった (Fig. 2(a) 参照) [1]。この手法では、共振器ミラーの位置をピエゾ素子などにより制御し、共鳴条件

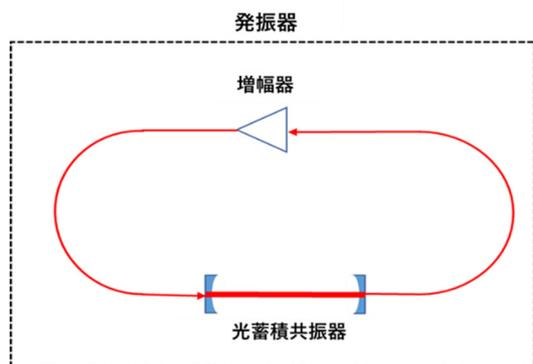
$$L_{cav} = n \frac{\lambda}{2} \quad (n: \text{integer}) \quad (1)$$

を満たすことにより光を蓄積する。より多くの光を蓄積するために共振器の増大率を大きくすると、振動や温度変化等の外乱に対して敏感になり、共振器長制御による共鳴維持が非常に困難になってしまう。この課題を解決するために「自発共鳴」と呼ばれる新たな機構を取り入れた自発共鳴型光蓄積共振器の開発に取り組んできた。この共振器では Fig. 2(b) のように共振器と増幅器が一体化した系を用いている。増幅器 (利得媒質) の自然放出を発振の起点とし、これを共振器に入射すると共鳴条件を満たす成分が蓄積される仕組みである。このとき、共振器透過光は必ず共鳴条件を満たすため、これを増幅し再び共振器に入射することを繰り返す共鳴条件を満たす光のみが自発的に発振、共鳴する。つまり、共振器長制御が原理的に不要となり、従来の光蓄積共振器の限界を超えた高増大率の実現が期待される。先行研究では

自発共鳴 CW 発振にて超高増大率(19 万倍)を一切の外部フィードバック制御無しで達成している[2]。



(a) Conventional optical cavity.



(b) Self-resonating optical cavity.

Figure 2: Schematic of a (a) conventional and (b) self-resonating optical cavity.

3. 実験セットアップ

LCS 光源への応用のためには、電子ビームの繰り返しに一致した高ピークパワーのパルスレーザーを蓄積することが必要である。つまり、自発共鳴型光蓄積共振器においてパルス発振を行う必要がある。これを実現するためには、ファイバー内の高強度パルス成分のみを選択する過飽和吸収機構(Fig. 3 青線部分)、共振器内を往復するパルスと外部ループを 1 周するパルスが共振器内で重なり合うこと(パルス重なり条件)が必要である。このパルス重なり条件は、共振器の繰り返し周波数 f_{cav} 、外部ループの基本繰り返し周波数 f_{loop} 、共振器長 L_{cav} 、外部ループ長 L_{loop} を用いて以下のように表される。

$$f_{cav} = n f_{loop} \Leftrightarrow L_{loop} = n \times 2L_{cav} \quad (n: \text{integer}) \quad (2)$$

本研究では繰り返し 357 MHz の電子ビームとの LCS を見据え、先行研究[3]よりも高い繰り返しである 357 MHz 付近での自発共鳴型モードロック発振を目指し、実験セットアップの構築を行った。構築したセットアップの模式図を Fig. 3 に、実物写真を Fig. 4 に示す。共振器は 2 枚の凹面鏡を対向して配置したファブリペロー型を用いている。共振器ミラーはステンレス製の高剛性筐体(SUS)にマウントされており、 piezoelectric actuator (PZT) による共振器長スキャンが可能となっている。増幅器として、シングルパスで高利得が得られる Yb 添加ファイバー

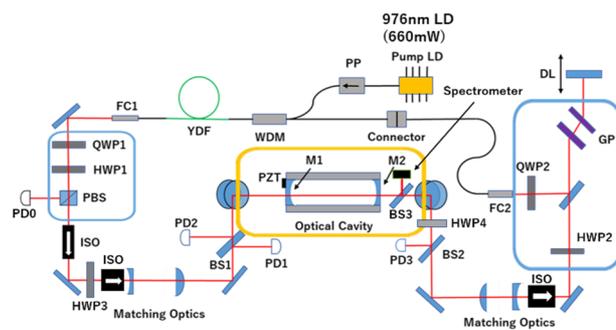


Figure 3: Schematic of the experimental setup.

(YDF)を用いた。励起用レーザーダイオード(LD)は Fiber Bragg Grating で 976 nm に波長安定化されたものを使用し、戻り光を抑制するポンププロテクタ(PP)を介して波長分割多重カプラ(WDM)に入力され、YDF と結合される。励起方式は周回するシグナル光に対し励起光を同一方向に入射する前方励起を採用した。自由空間光路中には非線形偏波回転(NLPR)による受動モードロックを引き起こすための偏光素子(1/2 波長板、1/4 波長板、偏光ビームスプリッター:PBS)、光の周回方向を規定するアイソレータ:ISO、ファイバーコリメータ(FC)、出射光モードと共振器モードを結合させるためのマッチングレンズ系、モニター用のビームサンプラ(BS)、分散補償のための透過型回折格子対を配置してある。回折格子対を利用することでハーモニック受動モードロックが起こることが報告されており[4]、本研究では外部ループ中でループ基本周波数の 11 倍の繰り返しでの多パルス周回をアシストするために採用した。透過型回折格子対の先にある折り返しミラーは 1 軸ステージにマウントされており、ステップモータを用いて 1 μm の分解能で位置の微調整が可能となっている。この折り返しミラーは、パルス重なり条件を満たすためのループ長調整に使用する。なお、入射 FC と WDM は FC/PC コネクタで接続されており、ここを分離して外部 CW レーザーや電気光学変調器(EOM)を導入することで系のアラインメント調整等を行うことができる[5]。また、光学台上には水冷ヒートシンクが 19 枚設置されており、水冷により温度を安定させている。また光学台を覆う Box に発泡スチロールを設置し実験セットアップの温度恒温化を図っている。

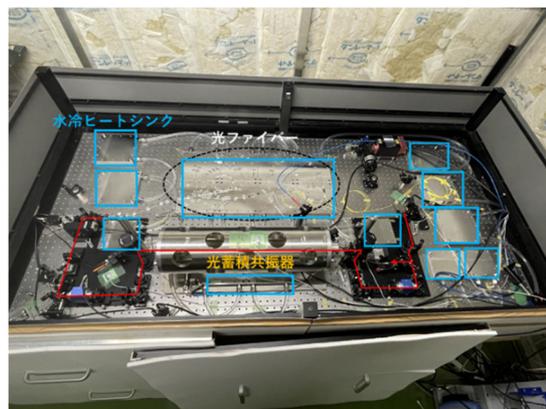


Figure 4: Photograph of the experimental setup.

4. 自発共鳴型モードロック発振と環境温度

4.1 温度安定化前の自発共鳴型モードロック発振

前項で示した実験セットアップの中にある、水冷ヒートシンクと発泡スチロールは環境温度安定化のための機構である。自発共鳴型モードロック発振の環境温度依存性について考察するため、ここでは環境温度安定化のための機構がない状態での発振の様子を示す。以下の Fig. 5 に 4000 秒間にわたって共振器内で蓄積された蓄積光強度の推移を、Fig. 6 に同時刻の実験室温度の推移を示す。

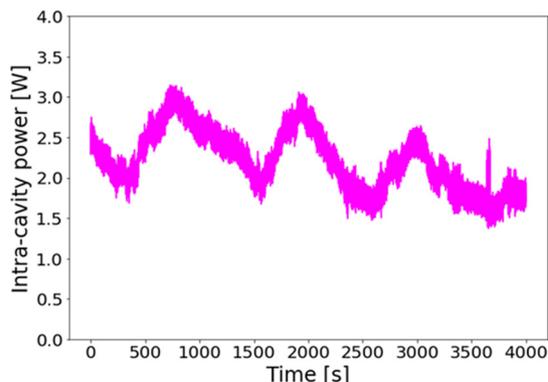


Figure 5: Time stability of Intra-cavity power.

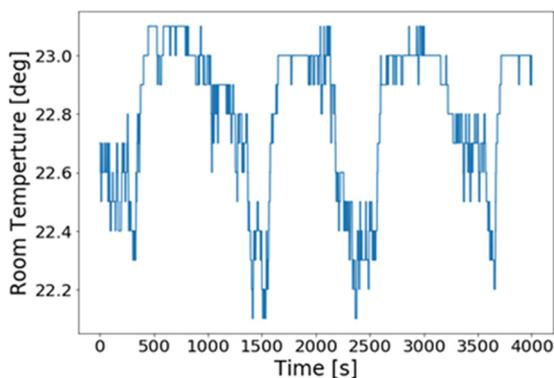


Figure 6: Room temperature log.

Figure 5 より、4000 秒間にわたってレーザー発振が継続したものの、蓄積光強度が上下動している様子が分かる。0 秒～2000 秒までの発振部分の蓄積光強度の RMS 安定度は 12.9 %であった。また、Fig. 6 より同時刻の 4000 秒間の実験室温度は蓄積光強度と類似した挙動で変化している。この結果から環境温度変化がレーザー発振の安定性に影響している可能性が示唆された。考察としては以下のように考えている。まず、環境温度が変化することで共振器長や外部ループ長が変化し、Eq. (2) のパルス重なり条件からのずれが生じる。次にループ全体の FSR (Free Spectral Range) と共振器の FSR にずれが生じ、ループ全体で発振しうる縦モードのうち中心周波数からずれた縦モードほど共振器に蓄積されなくなる。そして、縦モードの蓄積効率が変化することで蓄積光強度が変動する。この考察のもと、環境温度の安定化に取り組み発振の更なる安定化を目指した。

4.2 温度安定化後の自発共鳴型モードロック発振

環境温度変化がレーザー発振の安定性に影響を及ぼしていると考察した我々は、環境温度安定化のために実験セットアップに 2 つの対策を施した。一つ目が水冷ヒートシンクの設置である。光学台上には 19 個敷き詰めることで、水冷により温度安定化を図った。二つ目が光学台を覆う Box に発泡スチロールを設置したことである。発泡スチロールが断熱効果を発揮することで、実験セットアップの温度に対する外部の環境温度からの影響を排除した。これらの対策を施した後に得た結果を以下に示す。Figure 7 に 4000 秒間の蓄積光強度の推移を、Fig. 8 に同時刻の環境温度の推移を示す[6]。なお、温度測定は実験室、Box 内気体、共振器筐体、ファイバー部分、上流ブレードボード、下流ブレードボードの 6 か所で行った。上流とは共振器に光が入射する前に通過する部分、下流とは共振器から光が透過した後に通過する部分である。

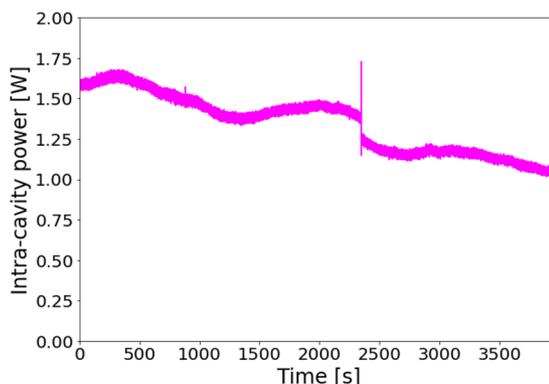


Figure 7: Time stability of Intra-cavity power after stabilizing setup's temperature.

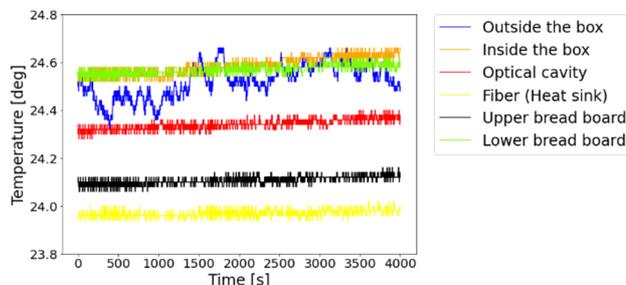


Figure 8: Temperature log of 6 points of experimental setup.

Figure 7 より 2500 秒手前付近で一度発振が途切れているが再び発振し始める様子が見られる。この様子には、「自発共鳴」の系が自発的に発振波長を選択するという特徴が表れていると考えられる。レーザー発振が継続している 0～2000 秒までの蓄積光強度の RMS 安定度は 5.9 %であった。蓄積光パワーは 1.34 W、増大率は 78.5 倍であった。また、Fig. 8 より各測定箇所の温度変化(最大値-最小値) は以下の Table 1 のようになった。

Table 1: Temperature Change of 6 Points of Experimental Setup

Room (Outside the box)	0.34 °C
Inside the box	0.14 °C
Cavity	0.12 °C
Fiber	0.08 °C
Upper BB	0.10 °C
Lower BB	0.10 °C

温度安定化に取り組む前は実験室温度の変化は 1.0°C (Fig. 6 より)であった。温度安定化へ取り組んだ後は実験室温度の変化は 0.34°Cに抑制され、その他の箇所も 0.14°C以下に抑えることに成功した。また、蓄積光強度の安定度も同じ 2000 秒間において 12.9 %から 5.9 %へと向上した。

5. パルス波形と波長スペクトル

Figure 7 で示した自発共鳴型モードロック発振時におけるパルス波形と波長スペクトルの様子を Fig. 9、Fig. 10 に示す。なお、Fig. 10(a)は発振が途切れる前の波長スペクトルを、Fig. 10(b)は発振が途切れた後の波長スペクトルを示している。

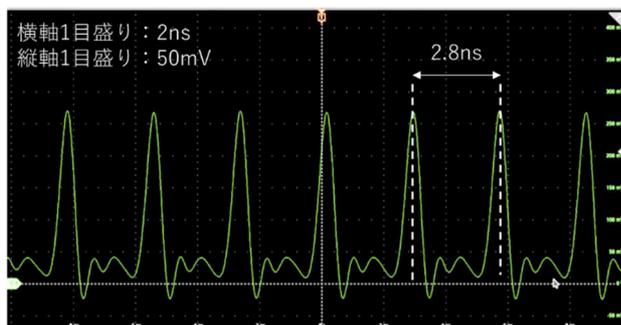
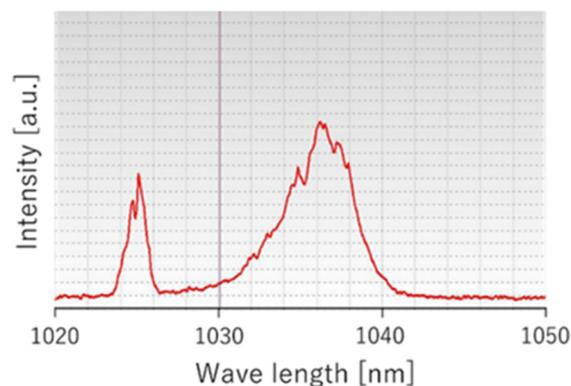
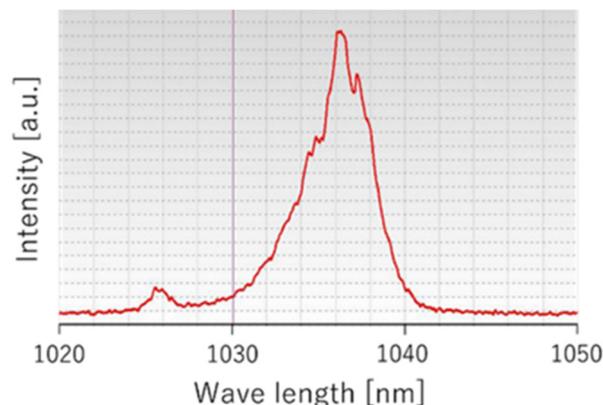


Figure 9: Waveforms of mode-locked pulsed oscillation with self-resonating mechanism.

Figure 9 のパルス波形から確かにモードロックパルス発振をしていたことが確認される。また、Fig. 10 より発振が途切れる前後で波長スペクトルが変化していることから発振状態が別の状態に切り替わったことが示唆される。



(a) Spectrum of mode-locked pulsed oscillation before mode-locking was interrupted



(b) Spectrum of mode-locked pulsed oscillation after mode-locking was interrupted

Figure 10: Spectrum of mode-locked pulsed oscillation with self-resonating mechanism.

6. 温度安定化の現状

LCS 光源への応用のためには、モードロックパルス発振を長時間安定的に、途切れることなく継続させる必要がある。温度安定化をより高精度に行い、環境温度変化をより抑制することで途切れなくモードロックパルス発振を継続させることができると考えている。現在施した対策は以下の 4 つである。

1. 発泡スチロールを真空断熱材に変更。
 真空断熱材は発泡スチロールより 2 桁熱伝導率が低い
 ため、断熱効果が高く Box 内の温度安定化につながると
 考えている。
2. 実験室にヒーターの設置。
 熱源の設置は、常に最大出力で部屋を暖める機能が
 あることで、エアコンによる冷房機能が休むことなく稼働
 することを見込んでの対策である。これまでは実験室の空
 調をエアコンによる冷房機能のみで行ってきたが、実験
 室温度とエアコン設定温度が一致すると冷房機能が休
 止する事態が発生しており、熱源と冷房機能を最大限に
 機能させることでそれらの均衡点で温度一定となること
 を想定している。

3. エアコンの変更。
 エアコンの冷房機能を改善するために 10 年以上前のモデルから最新の市販エアコンに変更した。

4. ビニールによる仕切りの設置。
 実験室のドアの部分にビニールによる仕切りを設置することで、ドアの開閉時に外気になるべく入らないようにする目的である。

我々の実験室は KEK の ATF 棟の中にあり、その実験室の中に実験 Box があり、その中に実験セットアップが存在している。ATF 棟の温度変化が実験室およびその中の実験 Box や実験セットアップの温度変化に影響していることから、2、3、4 により ATF 棟の温度変化が実験室温度に影響することを防ぎ、1 や水冷ヒートシンクによって実験室温度の変化が Box 内の実験セットアップの温度に影響することを防ぐと想定している。これらの対策を行った後の環境温度変化を以下の Fig. 11 と Table 2 に示す。Table 2 は各測定箇所の最大値と最小値の差を表している。

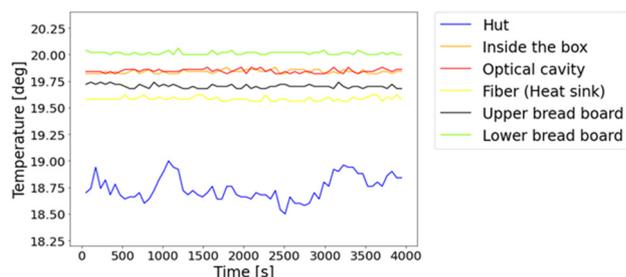


Figure 11: Latest temperature log of 6 points of experimental setup.

Table 2: Temperature Change of 6 points of Experimental Setup (latest version)

Room (Outside the box)	0.50 °C
Inside the box	0.06 °C
Cavity	0.06 °C
Fiber	0.06 °C
Upper BB	0.06 °C
Lower BB	0.06 °C

実験室温度の変化が 0.5°C と以前より (Table 1) 大きくなっているものの、そのほかの実験セットアップ各箇所の温度変化が小さくなっているため、特に真空断熱材の効果があると思われる。

7. まとめ

本研究では、レーザーコンプトン散乱光源のための自発共鳴型光蓄積共振器の開発を行っている。現在、反射率 99.0% の共振器ミラーを用いて、モードロック発振部分の安定度 5.9% の 4000 秒間の自発共鳴型モードロック発振に成功した。発振の安定度向上のために、温度安定化に向けた取り組みを行い、環境温度を 0.1°C 以下に抑制した。今後は、温度安定化への取り組みが

完了した現状のセットアップでのモードロック発振の再現と KEK の LUCX (小型電子加速器) へレーザーを送りマスタースレーターとして用いる実験を行いたいと考えている。

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] K. Sakaue *et al.*, J. Particle Accelerator Society of Japan Vol. 10, No. 1, 32-42 (2013).
- [2] Y. Uesugi *et al.*, APL Photonics 1, 026103 (2016).
- [3] Y. Hosaka *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 1350, 021028 (2019), conference proceedings.
- [4] Y. Deng *et al.*, Opt. Lett., Vol. 29, Issue 18, pp. 2121-2123 (2004).
- [5] K. Yamashita *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOA08, p.141.
- [6] Y. Koshiba *et al.*, “Feedback-free, mode-locked laser pulse accumulation in a self-resonating optical cavity”, to be published at Optics Express, 2022.