

レーザーコンプトン散乱光源に向けた自発共鳴型光共振器の現状

CURRENT STATUS OF A SELF-RESONATING OPTICAL CAVITY FOR LASER-COMPTON SCATTERING SOURCES

大塚誠也^{#, A)}, 小柴裕也^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, Aryshev Alexander^{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)}, 上杉祐貴^{C)}, 菅原直人^{C)}, 坂上和之^{D)}, 高橋徹^{E)}, 保坂勇志^{F)}
Seiya Otsuka^{#, A)}, Yuya Koshiba^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Alexander Aryshev^{B)}, Junji Urakawa^{B)},
Tsunehiko Omori^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Masafumi Fukuda^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Yuuki Uesugi^{C)},
Naoto Sugawara^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{D)}, Tohru Takahashi^{E)}, Yuji Hosaka^{F)}

^{A)} Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

^{D)} Photon Science Center, The University of Tokyo

^{E)} Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

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

Abstract

Research and development of optical enhancement cavities have become a significant issue regarding the increase of brightness in laser-Compton scattering light sources. Since the realization of a high enhancement factor cavity requires precise control of cavity length, noisy environment in accelerator facilities limit the intra-cavity optical power. The self-resonating optical cavity is a new approach to overcome this issue, by installing an optical cavity in the loop of a laser oscillator. The principle has been demonstrated, and we are currently conducting studies on mode-locked oscillation with high repetition rate of 357 MHz, which is desired for KEK-LUCX accelerator. Here, we report the current status and future prospects of the self-resonating optical cavity.

1. はじめに

1.1 レーザーコンプトン散乱光源

電子ビームとレーザーの衝突によって高エネルギーの光子を生成するレーザーコンプトン散乱(LCS)は、大型放射光施設に匹敵する高品質 X 線/ γ 線を小型の装置で生成できる。この特徴から医療・産業に代表される幅広い分野で光源としての応用が期待されている。しかし既存の放射光源と比較して光量が劣り、実用化に向けては高輝度化が必要である。LCS 光量は電子ビーム、レーザーそれぞれの強度に比例して増加する特徴がある。我々はレーザーの高強度化に着目し、光共振器に衝突レーザーを蓄積しハイパワー化することで散乱光量を増加させる手法の開発を行ってきた[1]。

1.2 光共振器

光共振器は、共振器長 L_{cav} を外部フィードバック制御することで共鳴条件

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

を満足させ、光を蓄積する。ここで、 λ は蓄積光の波長である。蓄積光の強度増大率は共振器のフィネスに依存し、高フィネス共振器を用いることでハイパワーの光を蓄積できる。一方、フィネスに反比例して共鳴幅が狭くなる。これは共鳴条件への要求精度が厳しくなり、共鳴維持が困難になることを意味する。例えば増大率 10 万倍の共

振器を構築しようとすると、共鳴維持のために要求される共振器長制御の精度は $O(\text{pm})$ になってしまう。静的環境下で非常に高精度のフィードバック制御を用いることで、このような精度の共鳴維持は達成可能ではある[2]。しかし雑音が大きな環境下で長時間の運転が要求される加速器施設では達成困難な精度であり、LCS 光源への応用を考えると技術的に大きな課題となっていた。

1.3 自発共鳴型光共振器

従来の光共振器システムは、レーザー発振器と光共振器という互いに独立した系を外部フィードバックで結びつけなければ共鳴を維持できない点に困難があった。この困難を打破する新たなシステムとして、我々は自発共鳴型光共振器の開発を進めている。本システムは、Fig. 1 に示すようにレーザー発振器と光共振器を一つの系に一体化することでレーザー発振状態と共振器への光蓄積を同時に実現し、フィードバック制御無しで共鳴状態を維持できる。具体的には、共振器透過光を増幅した後再び共振器へ再入射してループを形成することで、常に共振器の共鳴条件を満たす波長成分のみが周回して成長し、レーザー発振する。このとき共振器を含んだ系全体として発振波長を自発的に選択するため、共振器長の制御が原理的に不要になる。従って、従来の技術的限界を超えた高フィネス、高増大率共振器を実現できる。我々は既にフィネス 394,000 の共振器において自発共鳴型 CW 発振に成功しており、増大率 187,000 倍、強度揺れ 1.7%の安定した発振を一切の共振器長制御なしで実現している[3]。

[#] s-otsuka@ruri.waseda.jp

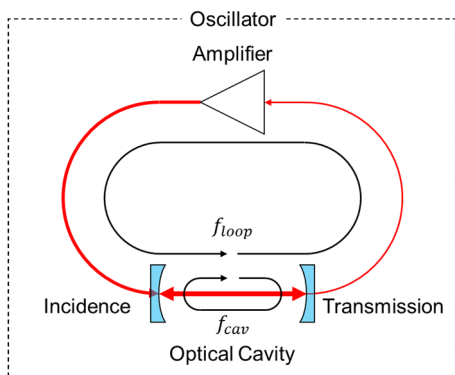


Figure 1: Schematic of self-resonating optical cavity.

1.4 自発共鳴型光共振器におけるパルス発振

LCS 光源への応用を考えると、特に線形加速器のように電子ビームがパルス運転する場合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。即ち、自発共鳴型共振器でのパルス発振が必要である。これを実現するためには、i)パルス発振を誘起するモードロック機構、ii)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。パルス重なり条件は、共振器の繰り返し周波数 f_{cav} と外部ループの基本繰り返し周波数 f_{loop} を用いることで以下のように表現できる。

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

パルス重なり条件を満たすように共振器長や外部ループ長を調整する必要があるが、要求精度はループを周回するパルスのパルス幅以下である。後で述べるように、本研究で構築したセットアップにおいて想定されるパルス重なり条件の要求精度は空間距離に換算して $O(100\mu\text{m})$ 以下である。高フィネス共振器における制御精度である $O(\text{pm})$ と比較するとはるかに要求精度は緩和される。これまでに、我々は低フィネス(~ 220)、低繰り返し($\sim 41.4 \text{ MHz}$)の共振器で自発共鳴型パルス発振の原理実証に成功している[4]。

本研究は次のステップとして、加速器へのインストールを念頭に入れた高繰り返し化、および発振の安定性向上試験を実施する。KEK-LUCX 加速器に同期した 357 MHz の繰り返しを有する自発共鳴型光共振器を構築し、検証を進めている。ここでは、これら取り組みの現状を報告する。

2. 実験セットアップ

構築したセットアップを Fig. 2 に示す。共振器は2枚の凹面鏡を平行に配置したファブリペロー型を採用している。共振器ミラーはステンレス製の筐体(共振器長設計値: 420 mm)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である。共振器パラメータは Table 1 の通りである。 f_{cav} が 357 MHz より 2 MHz 程度大きくなっているが、これは共振器筐体の設計値より 1 mm 程厚いミラーを使用したため、共振器長が設計値より 2 mm 程短くなっているからである。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

(YDF)を得る媒質としたファイバー増幅器を用いた。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による過飽和吸収効果を引き起こすための偏光素子(1/2 波長板:HWP, 1/4 波長板:QWP, 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[5], 本研究では外部ループ中で f_{loop} の n 倍の繰り返しでのハーモニックモードロックを引き起こす目的で採用した。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、マイクロメータを用いて位置の微調整が可能である。また、系全体は大気環境下に置かれている。

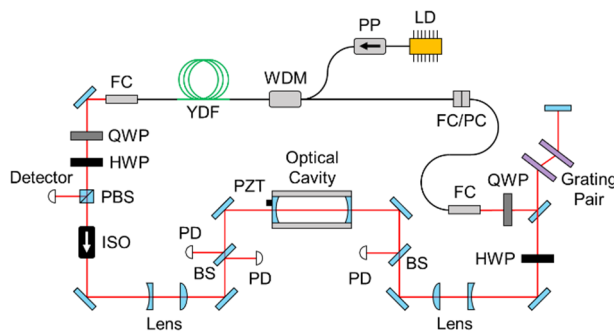


Figure 2: Experimental setup.

Table 1: Cavity Properties

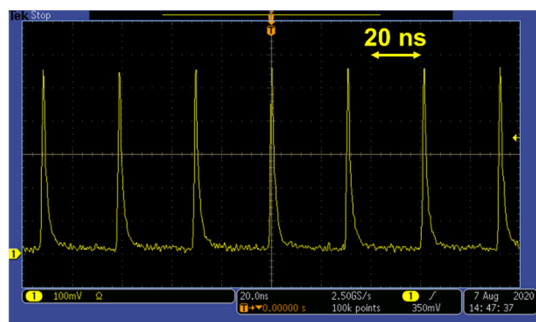
Cavity repetition frequency f_{cav}	$358.880 \pm 0.006 \text{ MHz}$
Cavity length L_{cav}	$417.678 \pm 0.007 \text{ mm}$
Curvature of mirrors	250 mm
Reflectivity of mirrors	$\sim 99 \%$
Finesse	307.2 ± 7.6

3. 結果と考察

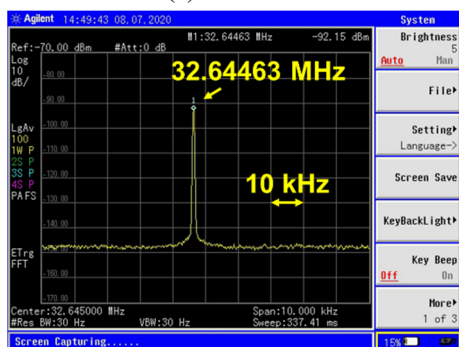
3.1 共振器ミラー無しでのパルス発振

まず共振器ミラーを外して受動モードロックによってシングルパルス発振させ、ループ基本周波数 f_{loop} の測定及び調整を行った。この系は非線形偏波回転を利用する一般的なファイバー型受動モードロックレーザーと等価である。PBS 出力から得られた光強度の時間波形と周波数スペクトルを Fig. 3 に示す。安定したモードロック発振が得られた。周波数スペクトルは RF スペクトラムアナライザを用いてバンド幅 30 Hz で測定した。オシロスコープ上で求まる f_{loop} は 32 MHz 程度であったため、有効数字

6桁の精度で f_{loop} を精密測定できる。今回は $f_{cav} = 11f_{loop}$ となるように $f_{loop} = 32.6446$ MHz にループ長を調整した。この値は、ミラー厚さ分の光路長の伸びを考慮して $f_{cav}/11$ よりも大きめの値となっていることに注意されたい。また、オートコリレータを用いてパルス幅を測定した結果、Gauss分布を仮定するとFWHMで0.912 psと求まった。従って、パルス重なり条件への要求精度は空間距離に換算して $O(100 \mu\text{m})$ 以下程度である。



(a) Waveform



(b) Frequency spectrum

Figure 3: Waveform (a) and frequency spectrum (b) of passive mode-locked oscillation without the cavity.

3.2 f_{loop} 決定精度の評価

実際には共振器ミラーをセットした際の光路のずれ等の効果によって f_{loop} は厳密には $f_{cav}/11$ からずれてしまう。そこでマイクロメータによる微調整でパルス重なり条件を満たすように調整する必要がある。その際 f_{loop} の調整精度がパルス重なりに要求される精度を満足しなければなら

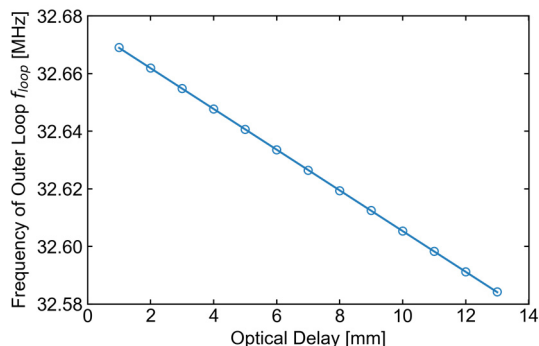


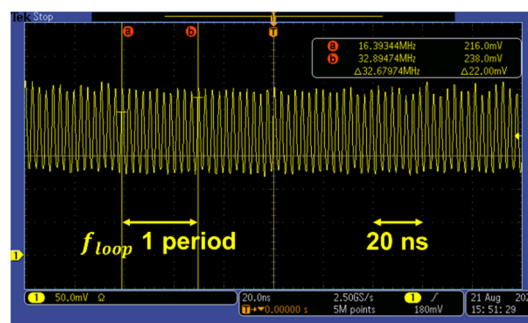
Figure 4: Measured repetition frequency of the outer optical loop as a function of the optical delay.

ならない。そこで f_{loop} 決定精度の評価を行った。マイクロメータによってループ長を変化させたときの f_{loop} の変化を Fig. 4 に示す。光学遅延に対し f_{loop} は線形に変化することが読み取れる。またマイクロメータの最小読み取り量と Fig. 4 の傾きから、 f_{loop} の決定精度は0.07 kHz, 自由空間長に換算して $20 \mu\text{m}$ と求まった。要求精度に対し十分な精度で f_{loop} を調整できることを確認した。

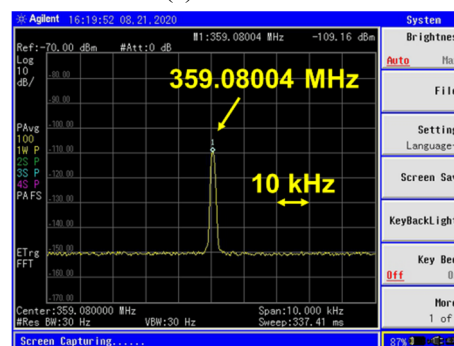
3.3 ハーモニック受動モードロック発振の検証

開発するハーモニック受動モードロックシステムでは11個の光パルスが周回することになる。ファイバー中の非線形効果によって、そのような複数パルスを発生させるのに十分な励起パワーが確保されているか、検証が必要である。そこで前段階として、光共振器を外した状態でハーモニック受動モードロックが起こるか検討した。

まず LD の駆動電流を 600 mA に固定した状態で波長板を調整すると、 f_{loop} の6倍の繰り返しをもつパルス構造がみられた。この状態で回折格子間距離を固定し、LD 駆動電流値を変化させることで f_{loop} の1~14倍の繰り返し周波数をもつハーモニック受動モードロックパルス発振に成功した。ハーモニックの次数は LD 駆動電流値に依存し、これを変化させることで任意のパルス数に制御できることを確認した。代表して、 f_{loop} の11倍の繰り返しでハーモニック受動モードロック発振したときの(a)パルス波形と(b)周波数スペクトルを Fig. 5 に示す。 f_{loop} 1周期内に等間隔の11パルスが発振していることがわかる。周波数スペクトルをみても、 f_{loop} の11倍である359 MHz付近に単一ピークが見られることから、 f_{cav} に調和した11個のパルスが外部ループを周回することが確かめられた。



(a) Waveform



(b) Frequency spectrum

Figure 5: Waveform (a) and frequency spectrum (b) of passive 11th harmonic mode-locked oscillation.

3.4 自発共鳴型の発振

共振器ミラーをセットして光を周回させ、自発共鳴型の発振を起こした。まず、自発共鳴型 CW 発振状態を確立した。そのときの PBS 出力の時間波形を Fig. 6 に示す。緩和発振による鋭いスパイク状のピークが現れており、発振モードが断続的に変化するマルチモード発振状態であることが示唆される。その強度変動は一般のマルチモードレーザーに比べて比較的大きく、自発共鳴型 CW 発振における典型的な波形である。

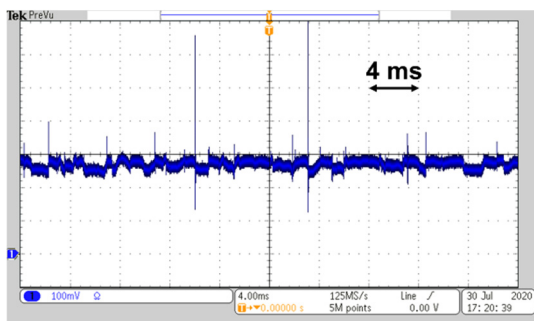
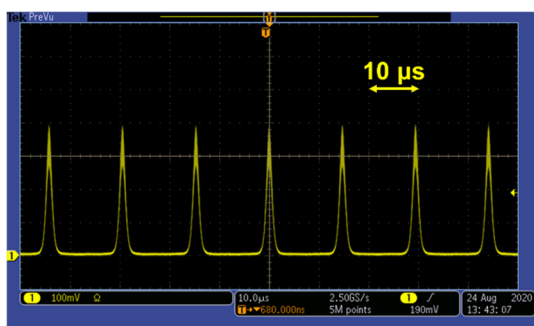
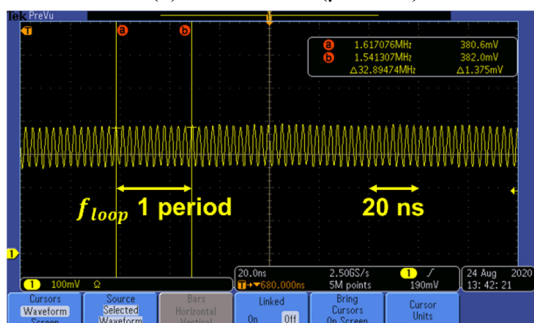


Figure 6: Waveform of self-resonating CW oscillation.

f_{loop} を調整する前は Fig. 6 のような波形しか見られなかったが、 f_{loop} を $f_{cav}/11$ 程度に調整すると、マイクロメートルで ± 0.1 mm の範囲のみで強度が大きく揺れるようになった。この状態で波長板を調整することで、二つの時間周期構造を有するパルス発振を確認した。そのときの波形を Fig. 7 に示す。(a)はマイクロ秒スケール、(b)はパルスのピーク付近をナノ秒スケールに拡大したものである。マクロにみるとパルス幅が約 $1 \mu s$ のパルスが $15 \mu s$ 程度の間隔で並んでいる様子がわかる(Fig. 7(a))。このパ



(a) Waveform (μs scale)



(b) Waveform (ns scale)

Figure 7: Waveforms of self-resonating passive mode-locked oscillation with the cavity.

ルス間隔は時間変動し、かつ励起パワーに依存性が見られた。発振は数秒程度経過すると途絶え、その後自動的に復帰するサイクルを繰り返した。マイクロ秒パルスの詳細をみると、 f_{cav} と一致した繰り返し 359 MHz のパルス構造がみてとれる(Fig. 7(b))。このことは、 f_{loop} 1 周期に相当するスパンの中に等間隔の 11 パルスが並んでいることから確認できる。共振器内部を遮蔽すると強度がゼロになることから、共振器を含んだループで発振が起きていることがわかる。また、このような発振が見られたマイクロメートルの範囲である ± 0.1 mm は周回パルスの想定されるパルス幅 $O(ps)$ と同じオーダーであることから、系はパルス重なり条件をおよそ満たしている状態にある。マイクロ秒スケールの構造は、レーザー媒質に蓄積された反転分布と周回光強度の相互作用に起因すると考えられる(これは Q スイッチパルスレーザーの発振原理と同じである)。マイクロ秒のパルス構造の中にハーモニック受動モードロックの兆候を確認できたことから、反転分布、つまりアンプ利得の向上と安定化が、持続的なモードロック発振のカギであることが示唆される。

4. 総括

LCS 光源への応用に向けて、 357 MHz の高繰り返し自発共鳴型パルス発振を目標に試験を行っている。非線形偏波回転を利用したハーモニック受動モードロックレーザーを元に開発を行い、光共振器を組み込んだ状態で f_{cav} と一致した繰り返し 359 MHz の光パルス列の発生に成功した。このパルス列は、反転分布が蓄積されアンプ利得が高まるマイクロ秒の間だけ形成される、パルストレイン構造を成していた。

今後は f_{loop} 、および光路の調整を行い、自発共鳴型パルス発振を目指す。環境雑音が発振に与える影響の調査も行う。また、LCS 光源への応用を考えるとさらなる高フィネス化も求められる。現在自発共鳴型パルス発振を実現しているフィネスは最高でも 300 程度であるため、フィネス 3000 以上、増大率 1000 倍以上での自発共鳴型パルス発振の実証も進めていく方針である。

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] K. Sakaue, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **80**, 123304 (2009).
- [2] F. Della Valle, *et al.*, Opt. Express **22**, 11570-11577 (2014).
- [3] Y. Uesugi, *et al.*, APL Photonics **1**, 026103 (2016).
- [4] Y. Hosaka, *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **1350** 012028 (2019).
- [5] Y. Deng, *et al.*, Opt. Lett. **29**(18), 2121-2123 (2004).