

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

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

山下洸輝^{#, 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

Laser-Compton scattering light sources have possibility to generate high quality X- or gamma-rays comparable to large synchrotron facilities with a small laboratory size device, but higher brightness is required for practical use. Therefore, optical cavities, in which laser pulses are accumulated and enhanced, are widely used to increase the number of scattered photons. However, to accumulate laser in a cavity with very high enhancement factor, extremely precise control of cavity length is required to maintain resonance condition and has been a technical issue in developing high enhancement cavities. In order to overcome this issue, we have been developing a self-resonating optical cavity. This cavity is based on a new idea that the system spontaneously selects a wavelength that satisfies the resonance condition, by installing an optical cavity inside the loop of laser oscillator. Therefore, any active feedback is unnecessary and extremely high enhancement factor can be expected. Here, we report the current status and future prospects of our self-resonating optical cavity.

1. はじめに

レーザーコンプトン散乱(LCS)とは、加速器によって生成される高エネルギー電子ビームとレーザーの衝突によって X 線・ガンマ線を生成する手法である(Fig. 1 参照)。LCS 光源は、大型放射光施設と同等の品質の光子を小型(10 m×10 m 程度)な装置で生成できる優れた特徴を有するため、医療・産業を代表とする幅広い分野への応用が期待されている。しかし、既存の放射光施設と比較して散乱光輝度が劣り、実用化に向けてはさらなる高輝度化が必要とされている。LCS 光量は衝突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、

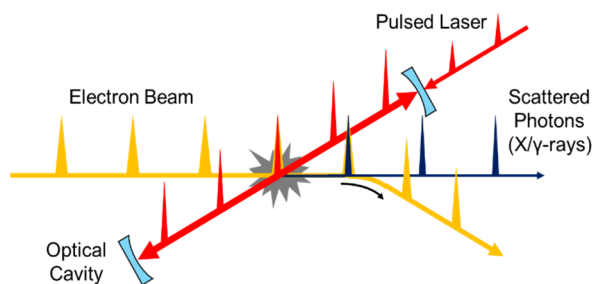


Figure 1: Schematic of laser-Compton scattering using an optical cavity.

[#] kouki_yama@fuji.waseda.jp

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は LCS 光源の輝度向上に非常に有用である。しかし、環境雑音が大きな加速器施設においてはハイフィネスの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。

2. 自発共鳴型光共振器

従来の光共振器では、発振器からの光を外部共振器に蓄積・増大する手法が用いられてきた(Fig. 2(a)参照)[1]。この手法では、共振器ミラー位置をピエゾ素子等を用いて制御し、共鳴条件

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

を満足させることで光を蓄積する。また、共振器のフィネスを大きくすることでレーザー蓄積増大率を大きくできる。しかし、LCS において散乱光子数増大のためフィネスを大きくすると、振動や温度変化等の外乱に対し敏感になり、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、「自発共鳴」と呼ばれる新たな機構を取り入れた光共振器の開発を進めてきた。本手法では Fig. 2(b)のように共振器と増幅器を光のループで結んだ系を用いる。増幅器(利得媒質)の自然放光を発振の起点とし、これを共振器に入射すると共鳴条

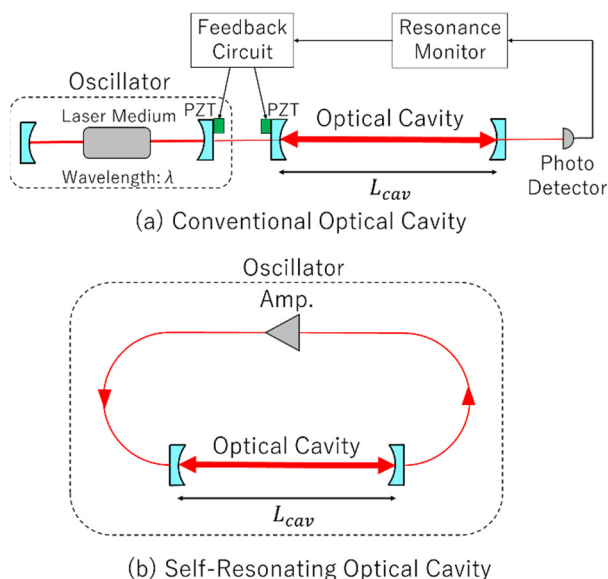


Figure 2: Schematic of a (a) conventional and (b) self resonating optical cavity.

件を満たす成分が蓄積される。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と、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、共振器長制御なしで共鳴が維持され、従来の共振器長制御精度の限界を超えた高増大率の蓄積を安定に実現できることが期待される。先行研究では自発共鳴 CW 発振にて超高フィネス($\sim 394,000$)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]。

3. 自発共鳴型モード同期発振

LCS 光源への応用を考えると、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、自発共鳴型光共振器でパルス発振を行う必要がある。これを実現するためには、①パルス発振を誘起するモードロック機構、②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。

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

上式のパルス重なり条件を満たすように外部ループ長を調整する必要があるが、要求精度はパルス幅($\sim 100\mu\text{m}$)以下である。従って、従来の高フィネス(>10000)共振器における制御精度である $O(\text{pm})$ と比べると、その要求精度は大きく緩和される。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同期発振を目指し、レーザー系の構築を行った。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

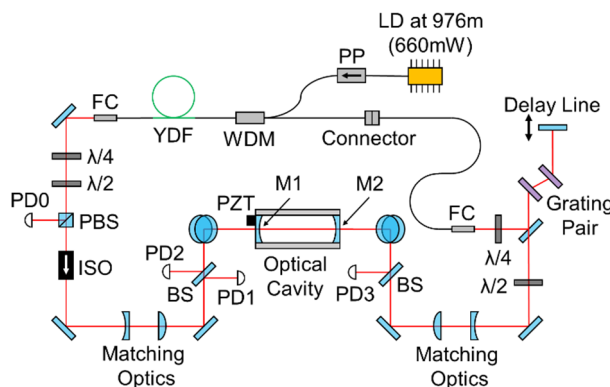


Figure 3: Schematic of the experimental setup.

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高剛性管体(SUS)にマウントされており、 piezoアクチュエータ(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。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)を利得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コプラ(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。ファイバー部分は水冷ブレッドボードを用いて、温度を安定させている。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 n 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 $1\mu\text{m}$ の分解能で位置の微調整が可能である。パルス重なり条件を満足させるためのループ長調整に利用する。なお、入射 FC と WDM は FC/PC コネ

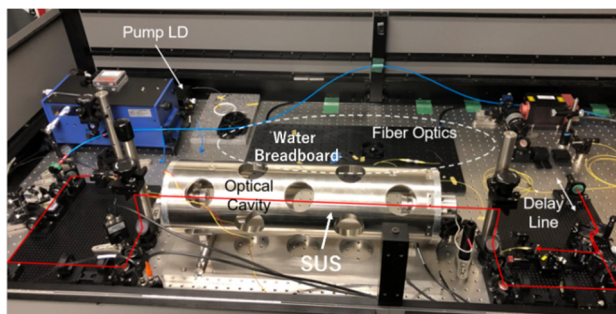


Figure 4: Photograph of the experimental setup.

クタで接続されており、ここを切り離して外部 CW レーザーや電気光学変調器(EOM)を導入することで、系のアライメント調整や共振器パラメータの測定を行うことができる。

Table 1: Parameters of the Optical Cavity
(Designed Value)

Cavity Length	420 mm
Reflectance of Input Mirror(M1)	99.0%
Reflectance of Output Mirror(M2)	99.0%
Curvature of Mirrors (M1 & M2)	250 mm
↓	
Cavity Repetition Frequency f_{cav}	357 MHz
Finesse	313

4. 結果と考察

4.1 共振器繰り返し周波数 f_{cav} 測定

測定にはサイドバンド法を用いた。測定原理図を Fig. 5

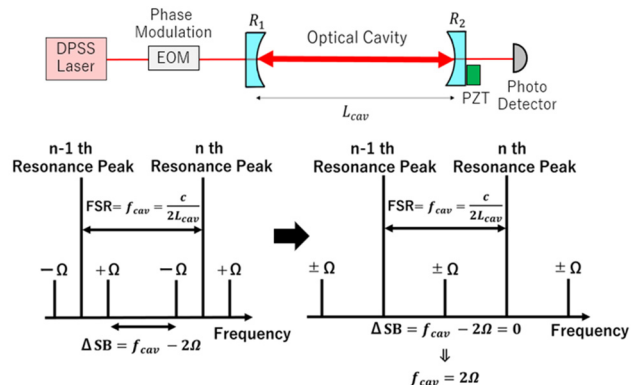


Figure 5: Schematic of the side band method.

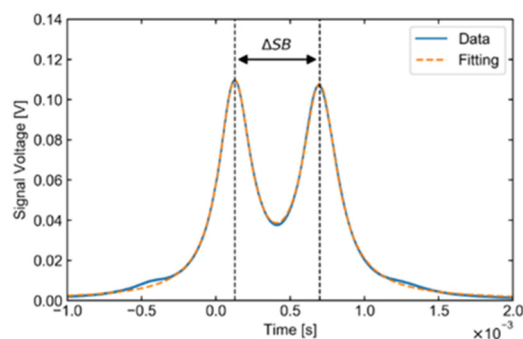
に示す。

外部単色レーザー($\lambda=1064$ nm)に位相変調 Ω を加え、共振器内に入射する。その後、共振器からの透過光をフォトディテクターでモニターすることで、Fig. 5 下図のような周波数スペクトルを得る。図左下の状態から位相変調 Ω の値を大きくしていくと、いずれ図右下のように隣り合うサイドバンドが重なり合う。このとき、隣り合うサイドバンド間距離 ΔSB は、

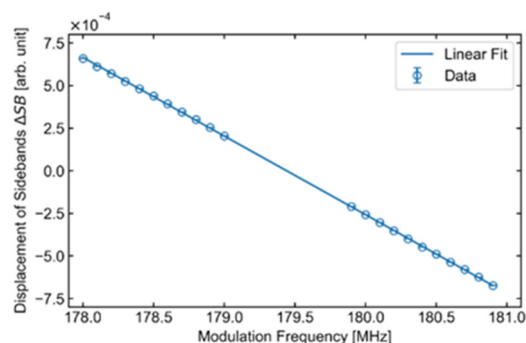
$$\Delta SB = f_{cav} - 2\Omega_0 = 0 \quad (3)$$

を満たすため、変調周波数 Ω_0 から共振器繰り返し周波数 f_{cav} を算出することができる。実際の測定では、隣り合うサイドバンドが重なり合う($\Delta SB = 0$)近傍で変調周波数 Ω を変化させ、その際の ΔSB を測定することで f_{cav} を算出した。Figure 6(a)はその一例である。この操作を繰り返すことで Fig. 6(b)のような測定結果を取得した。これに線形近似を施すことで、

$$f_{cav} = 358.880 \text{ MHz} \quad (4)$$



(a) An example of side band measurement



(b) Data plot for side band measurements

Figure 6: Measurement of cavity repetition frequency f_{cav} .

と求まった。

4.2 共振器フィネス測定

本研究ではフィネスの定義に基づいた測定を行った。フィネスの定義を以下に示す。

$$\mathcal{F} = \frac{FSR}{v_{FWHM}} \quad (5)$$

従って、共振器 FSR と共鳴線幅の v_{FWHM} からフィネスを求めることができるが、本セットアップでは共振器 $FSR = f_{cav}$ であり、これは前節 4.1 で既に求まっているため、共鳴線幅の v_{FWHM} を測定した。測定における周波数スペクトルを Fig. 7 に示す。サイドバンド法で変調周波数 $\Omega = 10$ MHz とした際のサイドバンドの位置を物差しとして使用し、共鳴線幅の v_{FWHM} を算出した結果、

$$v_{FWHM} = 1.168 \text{ MHz} \quad (6)$$

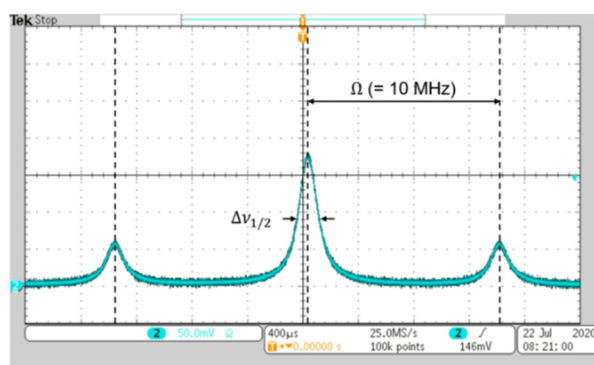


Figure 7: Frequency spectrum.

と求まった。これと既知の共振器 FSR=358.880 MHz を式 (5) に代入することで共振器フィネス \mathcal{F} は以下のように求まった。

$$\mathcal{F} = \frac{358.880 \text{ MHz}}{1.168 \text{ MHz}} = 307.2 \quad (7)$$

ここで、フィネスの測定値から求まるミラーの実効反射率 R_{eff} は 98.98% である。また、ミラーの反射率の実測値から求まる $R_{eff} = \sqrt{R_1 R_2} = 99.09\%$ であり、フィネスの設計値は $\mathcal{F} = 313$ である。これらから、フィネスの実測値 (307.2) が設計値 (313) と比べて 2% 程度小さくなったことが理解できるが、ミラー表面のコンタミ等によって損失が増え、ミラーの実効反射率が 0.1% 程度低下したためと考えられる。また、フィネスの測定値より最適な共鳴点にロックされた場合を仮定して蓄積パワー増大率を算出すると、増大率=97.8 と求まった。

4.3 自発共鳴型モード同期発振の確認

パルス構造を保つためにループ長を共振器長の n 倍 (本研究では $n=11$) に調整することで、自発共鳴型モード同期発振に成功した (Fig. 8(a))。パルスの繰り返しは共振器の繰り返しに一致した 358.883 MHz であり、Q スイッチ発振に起因する不安定性は見られず (Fig. 8(b))、安定したパルス列の生成を確認した。

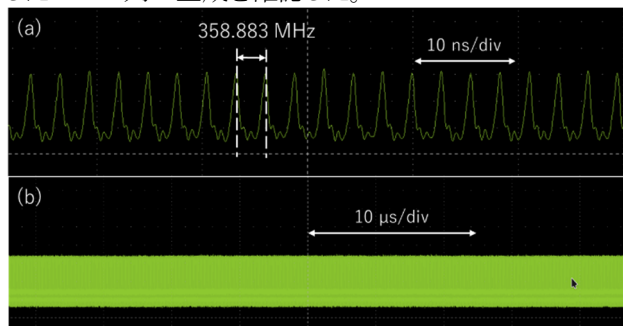


Figure 8: Waveforms of mode-locked pulsed oscillation with self-resonating mechanism. (a) 10ns/div and (b) 10µs/div.

4.4 パルス幅測定

オートコリレータを用いて、PBS 出力の自己相関波形を取得した。結果を Fig. 9 に示す。非常にきれいな自己相関波形であり、周回パルスの時間方向分布もきれいな

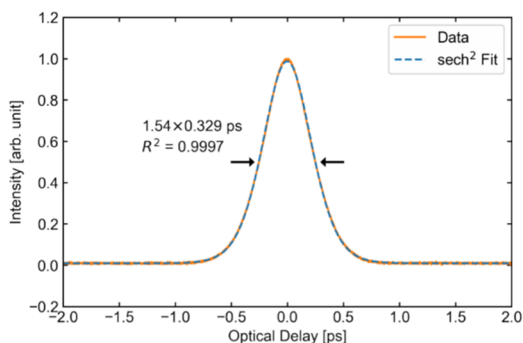


Figure 9: An autocorrelation waveform.

状態にあると推測される。パルス幅は sech^2 型の分布を仮定して、329 fs (FWHM) と求まった。回折格子対による分散補償の効果で、サブピコ秒の超短パルス発振を実現した。

4.5 波長スペクトル測定

分光器を用いて PBS 出力の波長スペクトルを取得した。典型的な波長スペクトルを Fig. 10 に示す。波長 1031 nm 付近を中心にスペクトル幅 6.2 nm (FWHM) となっている。CW 発振時のスペクトル幅 ~1 nm と比較してブロードなスペクトルであることから、実際にモード同期発振が起きていることを示している。また、ループ長、波長板、回折格子対の配置を固定した状態で波長スペクトルを観察したところ、常にスペクトル形状が変動している様子が見られた。ここから、共振器長の変動に追従して系全体として発振波長が変化している状態にあると推測される。

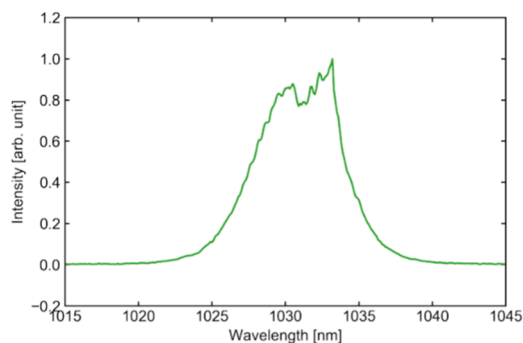


Figure 10: Spectrum of mode-locked pulsed oscillation with self-resonating mechanism.

4.6 波長スペクトルのループ長依存性

共振器長 L_{cav} が一定と仮定し、波長板を固定した状態でループ長のパルス重なり条件 ($L_{loop} = n \times 2L_{cav}$) からのずれ (Loop Length Detuning) を変化させ、各条件下で PBS 出力光の波長スペクトルを分光器を用いて測定した。結果を Fig. 11 に示す。Figure 11(b) は sech^2 型分布を仮定し、(a) から求まる FWHM スペクトル幅を各 Loop Length Detuning に対しプロットしたものである。Figure 11 を見ると、Loop Length Detuning が 0 μm のとき、最もスペクトル幅が広いことがわかる。これはループ全体で発振する縦モードのうち大部分が共振器内に蓄積されている、つまりパルス重なり条件: $L_{loop} = 11 \times 2L_{cav}$ に近い状態であることを示している。この状態からループ長がずれていくとスペクトル幅が狭くなっている。このことから、ループ全体の縦モードと共振器の縦モードにずれが生じ、中心周波数 (中心波長) からずれた縦モードほど蓄積効率が低下していることが伺える。また、Loop Length Detuning が大きくなるほどスペクトル幅が狭くなることから、時間と周波数 (波長) の不確実性からパルス幅が伸びていると予想できる。また、Loop Length Detuning に依存して中心波長が変化していく様子がみられた。これ

は、ループ長の変動による位相シフトに応じて系が発振波長を自発的に選択し、安定なモード同期条件下での発振が起きているためと考察できる。この現象に関しては、文献[5]でも同様の現象が報告されている。また、Loop Length Detuning が $0 \mu\text{m}$ 近傍では中心波長が長波長側に頻繁にホップする現象が確認された。つまり、厳密にパルス重なり条件を満たしていると考えられるループ長のごく近傍では頻繁にモードホップが生じ、発振が不安定になってしまう。一方、わざと Loop Length Detuning を $0 \mu\text{m}$ からずらすことで、モードホップが発生する頻度が下がり、非常に安定した発振が得られる可能性がある。この現象に関しても、文献[6]で同様の報告がなされている。また、パルス幅 329 fs ($\sim 100 \mu\text{m}$)と同程度

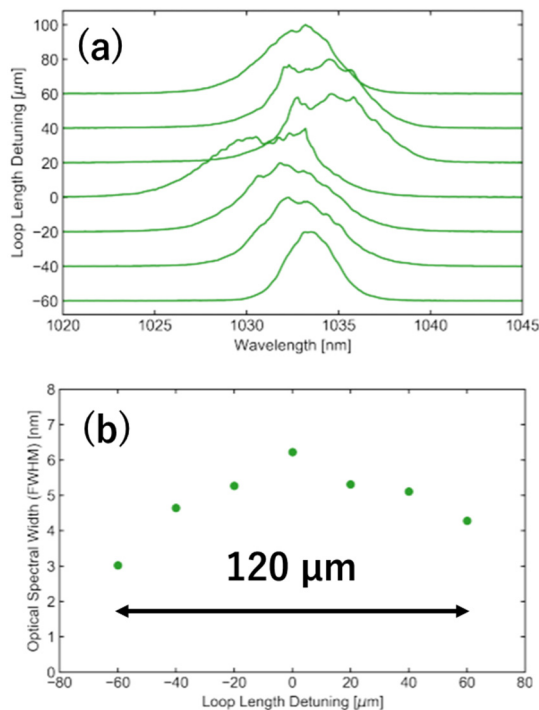


Figure 11: (a) Loop length dependence of oscillation wavelength spectrum and (b) their width.

である $120 \mu\text{m}$ の Loop Length Detuning を許容し、モードロックパルス発振を持続することが確認できた。

4.7 パワー測定

蓄積パワーとその安定性を評価するため、共振器入射光、反射光、透過光パワーの一部をそれぞれ光検出器 PD1,2,3 で 100 秒間モニターした。その結果を Fig. 12 に示す。ビームサンプラ(BS)の分岐比と出力ミラーの透過率によるパワー較正の結果、蓄積パワー 9.05 W であり、増大率 62.9 倍となっていることを確認した。蓄積パワーの rms 安定度は 2.4% であり、共振器長制御なしにも関わらず 100 秒間にわたる非常に安定したパルスレーザーの発振、共鳴を実現した。しかし、1 時間を超えるような長時間の安定発振は未だに実現できておらず、Fig. 13 に示すようにモードロック発振が一瞬途切れた直後に、直前までとは異なる発振状態ではあるが、自発的にモー

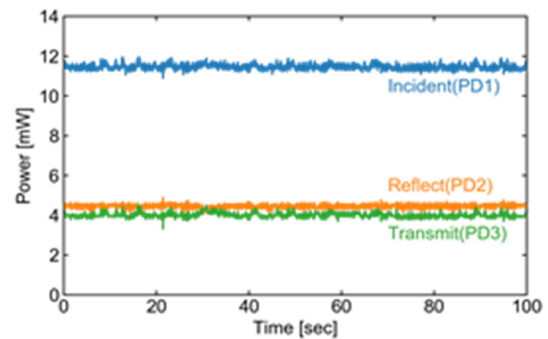


Figure 12: Time stability of output power.

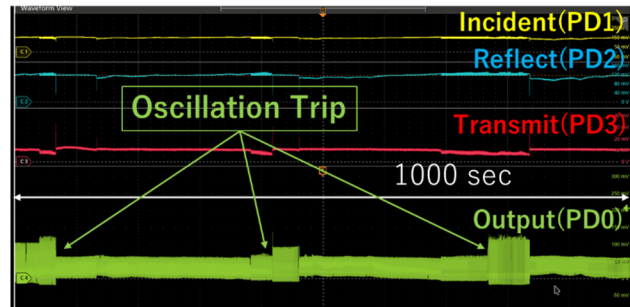


Figure 13: Example of 1000 second log.

ドロック発振に復帰する様子が確認されている。

5. まとめ

本研究では繰り返し 358.883 MHz の自発共鳴型モード同期パルス発振に成功した。共振器長制御無しで増大率 62.9 倍、短時間安定度 2.4% のパルスレーザー蓄積を実現した。課題としては、発振の長期不安定性と増大率の低さが挙げられる。発振の長期不安定性の要因としては温度・振動・電源の不安定性や寄生発振の存在が考えられるが、いまだ要因の特定には至っていない。従って、今後は要因の特定及び改善に取り組む。また、増大率に関しては今後、反射率 99.9% 以上のミラーを用いてさらに高増大率(1000 以上)の自発共鳴型モード同期発振の試験を進め、最終目標である 10 MW 蓄積を目指す。

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] G. T. Harvey *et al.*, Opt. Lett., Vol. 18, Issue 2, pp. 107-109 (1993).
- [6] U. Keller *et al.*, Opt. Lett., Vol. 15, Issue 23, pp. 1377-1379 (1990).