

赤外自由電子レーザーとファイバーレーザーとの同期のための位相同期システムの評価

EVALUATION OF THE PHASE-LOCKING SYSTEM FOR THE SYNCHRONIZATION BETWEEN THE MIDINFRARED FREE ELECTRON LASER AND THE FIBER LASER

川瀬啓悟^{#, A)}, 全炳俊^{B)}, 大垣英明^{B)}, 羽島良一^{A)}

Keigo Kawase^{#, A)}, Heishun Zen^{B)}, Hideaki Ohgaki^{B)}, Ryoichi Hajima^{A)}

^{A)} KPSI, QST

^{B)} IAE, Kyoto University

Abstract

To stabilize the carrier-to-envelope phase (CEP) of the infrared free-electron laser (FEL), we plan to inject a CEP-stabilized seeding pulse based on a fiber laser. To realize this scheme, the operations of the FEL and seeding laser must be synchronized with each other. For this purpose, we select the phase-locked operation of the fiber laser system, synchronizing it to the accelerator RF signal by adjusting the optical path length inside the laser oscillator using a phase-locked loop control. We report the present status of the synchronizing system.

1. はじめに

近年、高次高調波(HHG)を用いたアト秒領域の光パルス発生の研究が広く実施されている[1]。一般に、光のパルス長はスペクトル帯域幅が広いほど短くでき、より高いフォトンエネルギーの光はより広い帯域幅を得ることができる。HHGの最大フォトンエネルギーは駆動する光の波長の自乗に比例するので[2]、これまでよりも長波長の光でHHGを駆動することで、より短い光パルスの発生につながる。また、光パルスの繰り返し数の向上もHHGの課題のひとつである。多くのHHG光源の開発では、10 Hz から 1 kHz の固体レーザーを元にしたシステムが利用されている[3-6]。その中で、赤外の自由電子レーザー(FEL)を用いたより高繰り返しで高いフォトンエネルギーを持つアト秒パルス発生が提案されている[7-9]。

FELの特徴は広い動作波長を持つことと原理的に高繰り返し化が可能という点である。これらの特徴はHHGの高フォトンエネルギー化と高繰り返し化に適した光源である。

安定なHHG光源を実現するには、その駆動に用いる光パルスのキャリア-エンベロープ位相(CEP)が安定である必要がある。従来の共振器型FELはノイズ的な放射光からFEL増幅されるのでCEPは不安定であるが、CEP安定な光パルス列をFELの種光とすることでFELのCEPが安定化することが予言され[7]、現在その研究開発を進めている[9]。その中で本研究では、CEP安定な中赤外FELへの種光として、Ybファイバーレーザーシステムをもとにした差周波発生中赤外光源を構築している[10]。ここでFELへの種光とするためには、FELパルスと種光パルスが同期して動作する必要がある。そのため、現在、ファイバーレーザーシステムの外部同期システムの導入とその評価を進めている。本稿では、現在の外部同期システムの状況と今後の課題について報告する。

2. 実験

現在、京都大学自由電子レーザー施設(KU-FEL)の赤外FEL[11]を用いてファイバーレーザーシステムの同期精度を評価するための[12]、外部高周波信号同期システムを構築している。構築したファイバーレーザーシステムは、KU-FELのFEL共振器周波数29.75 MHzに合わせた繰り返しのYbファイバーレーザーモードロック発振器、回折格子を用いたパルスストレッチャー、9 Wのレーザーダイオードで励起するYbファイバー増幅器、回折格子対を用いたパルスコンプレッサーから構成されている。本システムでは外部高周波信号に対してモードロック発振器内に取り付けたピエゾアクチュエータミラーを制御することで位相同期させる。位相同期にはTEM Messtechnik社製のPhaseLock digital (PhaseLock)を用いている[13]。これはレーザーシステムを外部高周波信号に対して位相ロックループ(PLL)動作させていることと同じで[14]、PhaseLockが位相比較器とループフィルターに対応し、ピエゾアクチュエータに印加する電圧で周波数と位相を制御するモードロック発振器を電圧制御発振器に対応する[15]。Figure 1に位相同期システムの概略を示す。

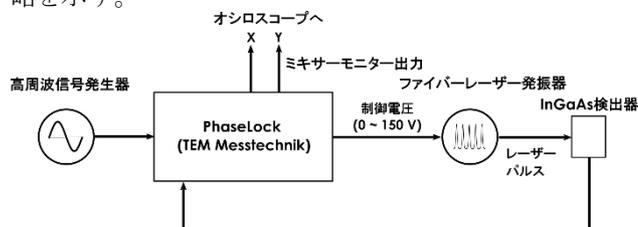


Figure 1: Schematic of the fiber-laser oscillator phase-locked to the external RF signal.

レーザーを同期させる対象は、KU-FELの加速器周波数である2856 MHzの高周波信号である。PhaseLockへ入力するレーザーパルス信号は、帯域幅5 GHzの高速度フォトダイオード検出器(DET08C/M, Thorlabs Inc.)を

[#] kawase.keigo@qst.go.jp

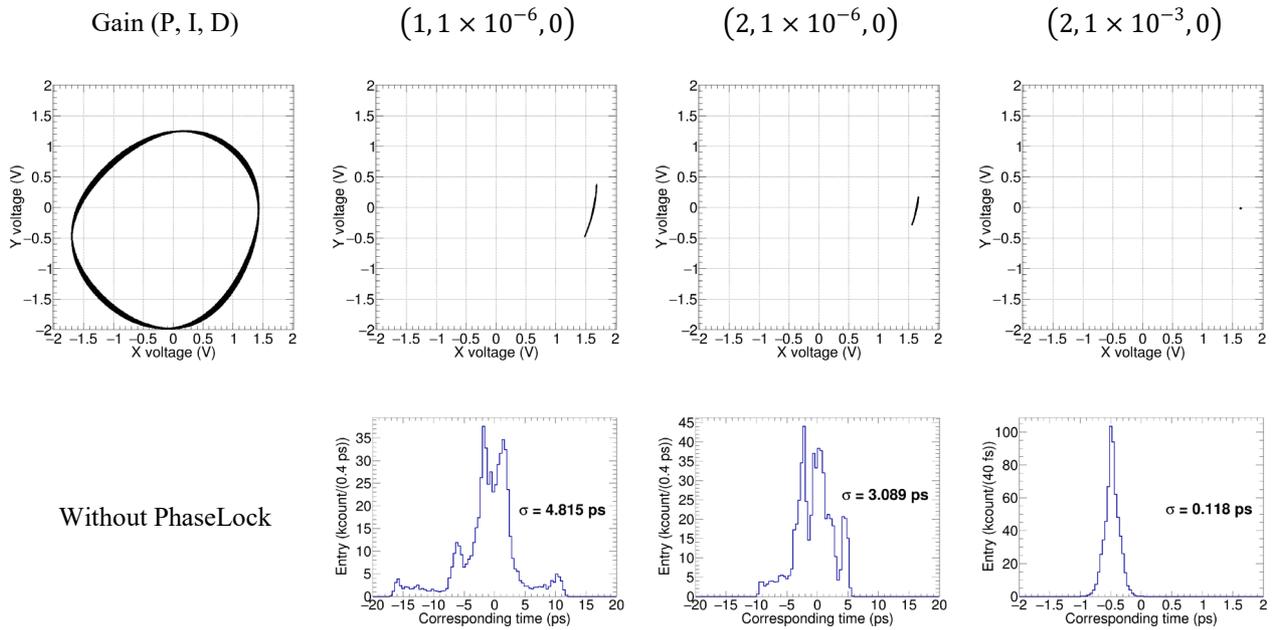


Figure 2: Lissajous plots of the mixer output signals from PhaseLock and corresponding timing histograms. The first column shows the plot without the PLL operation. The other columns show ones with different PID parameters (shown on the first row) at the PLL operation. The standard deviations of the histograms correspond to the time jitters.

利用し、モードロック発振器の繰り返し数 29.75 MHz の 96 次高調波である 2856 MHz の高周波信号を得る [16-18]。DET08C/M へは Yb ファイバー増幅器出力の一部を偏光子で分岐して利用する。PhaseLock の RF 入力へ DET08C/M の信号を入力し、LO 入力へ 2856 MHz の高周波信号を 7 dBm 程度のパワーで入力する。

PhaseLock の内部では、各入力信号を 2 分岐し、LO の一方の位相を 90° ずらして、RF との周波数混合を取り、低周波成分を抽出することで、 90° 位相のずれた 2 つの差周波信号(X, Y)を生成している。XY 信号は RF と LO 信号の差周波正弦波で、同じ振幅で互いに直交している。そのため、RF と LO 信号の周波数に小さなずれがある、すなわち両者が同期していない場合、XY 信号のリサージュ図形は円を描く。RF と LO 信号の周波数が互いに一致する時、リサージュ図形は一点に留まる。この状態が外部高周波信号とモードロック発振器とが位相同期している状態である。これを得るために、PhaseLock は piezoアクチュエータへの印加電圧を PID 制御で調整している。piezoアクチュエータは 5 mm 角で 2 mm 厚、無負荷共振周波数 500 kHz 以上のアクチュエータ (NAC2025, Noliac)で、その公称ストロークは 200 V で $1.9 \mu\text{m}$ である。ミラーは直径 7 mm で厚さ 2 mm の熔融石英基板の銀コートミラー (PF03-03-P01, Thorlabs Inc.)を用いている。繰り返し周波数の粗調のために、piezoアクチュエータ付きミラーのマウントをステップモーター駆動ステージ (TSDM60-20, シグマ光機)上に設置している。

3. 結果と考察

3.1 位相同期

PhaseLock の主な調整パラメータは PID 制御に関する

各ゲイン設定で、これらを最適化することにより、同期精度が向上、すなわち時間ジッターが最小化される。Figure 2 に同期していない時の XY リサージュ図形と PhaseLock の PID ゲインパラメータを変えた時の XY 図形と対応する時間ジッターを示す。PhaseLock が出力する XY のモニター信号は 20 kHz のサンプリングレートで記録されている。P ゲインを上げ過ぎると、piezoアクチュエータの動作が発振してしまう。初期値 1×10^{-6} の I ゲインに比較的大きな値である $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ を設定することで、時間ジッターは小さくなる。合わせて D ゲインについてもある程度の値を設定することで、ジッターが小さくなる。これまでの最適化結果を Fig. 3 に示す。この時に得られた時間ジッター評価値は 100 fs である。

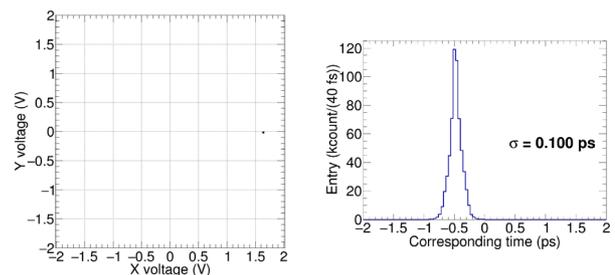


Figure 3: Lissajous plot of the mixer output signals and corresponding timing histogram with the optimum PID-parameter setting (P, I, D) = $(3, 1 \times 10^{-2}, 5 \times 10^{-3})$.

この評価試験では、外部高周波信号発生器として Agilent Technologies 製 N5181B を用いている。この装置のデータシートでは 2.488 GHz で 80 fs のジッターと評価されており [19]、結果の主要因は外部高周波信号によるものと考えられる。

3.2 位相制御

PhaseLock は同期位相を連続的に変化させることができる。Figure 4 は同期位相を変化させた時の XY プロットである。この機能を用いることで連続的に同期位相、すなわち外部高周波信号に対するレーザーパルスのタイミングを調整することができる。

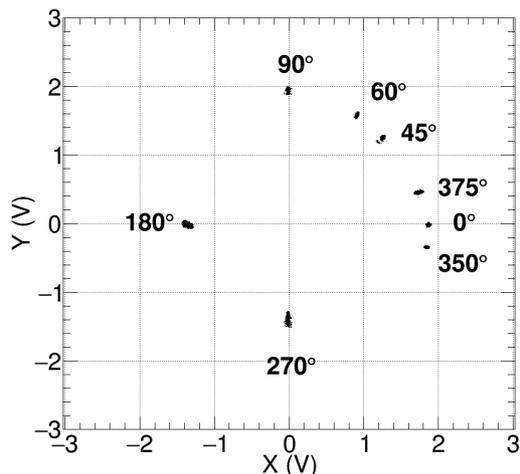


Figure 4: XY plot of the mixer output signals by changing the locking phase value.

3.3 モードロック発振器の周波数変化と同期安定性

現在、試験開発を実施している実験室では負荷の無い状態で 0.5°C 程度の空調制御がなされている。レーザー運転時には 1°C 程度の室温変化となる。その影響によるモードロック発振器の周波数変化を 20 Hz 程度と見積もると、繰り返し周波数 29.75 MHz に対する変化率は 6.7×10^{-7} である。これをファイバー長の変化と仮定すると、ガラスの屈折率を 1.5 として、変化率は 4.5×10^{-7} となる。一方、ファイバーの熱膨張係数は文献[20]で 4×10^{-7} と報告されており、概ね一致している。

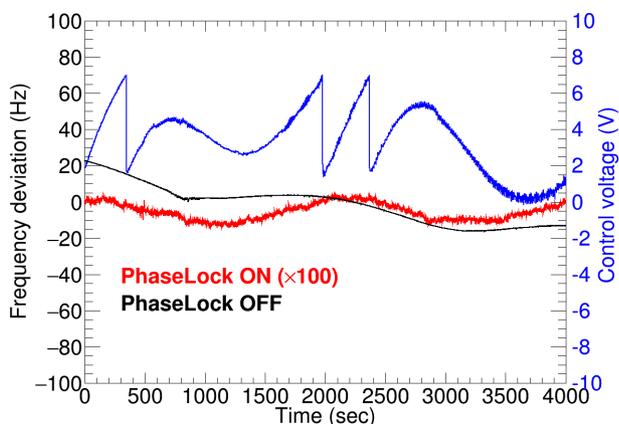


Figure 5: Frequency deviations with (red: 100 times magnified) and without (black) PLL. The blue line shows the control voltage of the piezo-actuator at PLL operation.

PhaseLock 動作時の周波数変化を同期制御無しの時とともにプロットしたものを Fig. 5 に示す。同期制御時の周波数変化は、非制御時と比べて 100 倍で示しているが、

ともに空調制御の影響が見られる。またピエゾアクチュエータ制御電圧モニター信号も合わせて示している。

このような比較的長い時間スケールの環境変化が外部同期させた電子ビームパルスとの位相関係にどのように影響するかの調査は今後の課題である。

4. まとめ

KU-FEL に位相同期したファイバーレーザーシステムを構築し、その同期システム単体の評価を実施した。今後、本システムを KU-FEL へ導入し、実用性を評価する。

謝辞

本研究は文部科学省平成 30 年度光・量子飛躍フラッグシッププログラム次世代レーザー基礎基盤研究「自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」(課題番号 JPMXS0118070271) の下で実施している。

参考文献

- [1] A. L’Huillier, Rev. Mod. Phys. 96, 030503 (2024).
- [2] J.L. Krause *et al.*, Phys. Rev. Lett. 68, 3535 (1992).
- [3] K. Midorikawa, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 090001 (2011).
- [4] T. Popmintchev *et al.*, Science 336, 1287 (2012).
- [5] N. Ishii *et al.*, Nat. Commun. 5, 3331 (2014).
- [6] C.-J. Lai *et al.*, J. Opt. 17, 094009 (2015).
- [7] R. Hajima and R. Nagai, Phys. Rev. Lett. 119, 204802 (2017).
- [8] R. Hajima, Atoms 9, 15 (2021).
- [9] R. Hajima *et al.*, “Research towards attosecond X-ray pulse generation using free-electron laser oscillators: 2023”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 899-901.
- [10] K. Kawase *et al.*, “Design study for carrier-envelope phase stabilized mid-infrared source”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 780-782.
- [11] H. Zen *et al.*, “Present status of free electron laser facility at Kyoto University”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 1150-1153.
- [12] R. Kiessling *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 080702 (2018).
- [13] M. Burian *et al.*, J. Synchrotron Rad. 27, 51 (2020).
- [14] M. Mori *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 87, 063307 (2016).
- [15] 小宮浩, 「高周波 PLL 回路のしくみと設計方法」(CQ 出版, 東京, 2009).
- [16] F.B. Kiewiet *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A 484, 619 (2002).
- [17] M. Felber *et al.*, “Laser Synchronization at REGAE using phase detection at an intermediate frequency”, Proc. IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 2624 – 2626.
- [18] M. Titberidze *et al.*, “Precise laser-to-RF synchronization of photocathode lasers”, Proc. FEL2019, Hamburg, Germany, pp. 364 – 367.
- [19] <https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7018-03380/data-sheets/5991-0038.pdf>
- [20] Y. Nakajima *et al.*, “A study for estimating thermal strain and Residual stress in optical fiber coatings”, 古河電工時報 第 122 号(平成 20 年 9 月) pp. 8-12.