

O-6

中赤外自由電子レーザー (IR-FEL) 外部蓄積共振器のための干渉計を用いた光パルス測定 Pulse measurement using an interferometer for a mid-infrared free electron laser external cavity

○黒澤歩夢¹, 住友洋介², 羽島良一³, 川瀬啓悟³, 早川恭史² 境武志²*Ayumu Kurosawa¹, Yoske Sumitomo², Ryoichi Hajima³, Keigo Kawase³, Yasushi Hayakawa², Takeshi Sakai²

Abstract: We have a research program to explore the application of the IR free electron laser (IR-FEL) to generate attosecond UV and X-ray pulses through the high harmonic generation (HHG), at LEBRA facility of Nihon University. Since a high-peak power and a short-pulse duration are needed for HHG, we are trying to stack FEL pulses at an external cavity for the enhancement, where the FEL pulse-width is an important parameter in order to make a precise adjustment of the external cavity for the pulse stacking. Therefore, we are constructing an interferometer to measure the FEL pulse-width that varies at different operating conditions of FEL.

1. 動機

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では中赤外自由電子レーザー (IR-FEL) による高次高調波発生 (FEL-HHG) を通じたアト秒光源生成を狙うプロジェクトに参加している。FEL-HHG の概略を Figure 1 に示す。自由電子加速器から生成された FEL パルス光を希ガスへと入射することでアト秒 (10^{-18} s) パルス幅を持つ紫外、X線のパルス光を作り出すことができるというものである。希ガスへ入射する種光は波長が長いほど生み出される高次高調波の波長が短くなるという結果が知られているため^[1], LEBRA で提供しているような中赤外の光が必要とされている。また、加速器が作り出す高繰り返し、数サイクルの光を用いることで高次高調波も高繰り返しで数サイクルの光となり^{[2],[3]}, 光源の質の向上に貢献することができる。

この高次高調波発生には、ピーク強度の高い FEL 光が必要とされており、そのために日本大学では外部共振器による蓄積でピーク強度増幅を目指している^{[4],[5]}。外部共振器とは、FEL パルス光の繰り返しに合わせた光の周回経路を作ることにより、パルスの重ね合わせを起こして強度を増幅する装置である。しかし、外部共振器の製作にあたり、加速器の FEL 光は平均強度が弱く周回経路を設計するためにそのまま用いることは困難であったため、パルス発振させた赤外モードロックファイバーレーザーで試験蓄積を兼ねた調整を行っている。このような外部共振器を用いた FEL パルス蓄積は世界でも実例が少なく^{[6],[7]}, 国内では皆無である。また、FEL のパルス幅は運転時の調整や条件などによって異なり、共振器の周回の調整はその変化に影響を受けるため FEL 運転時のパルス幅を把握しておく必要がある。パルス幅を知るための機器として時間分解性能の高いストリークカメラがあるが大変高価であり導

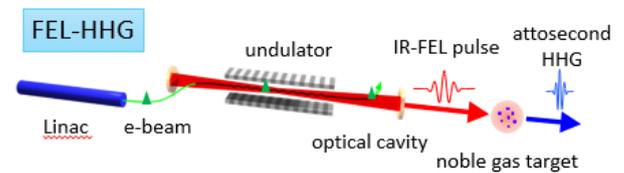


Figure 1. An illustration of the mechanism of FEL-HHG.

入が難しいため、LEBRA では比較的安価に作成できるマイケルソン干渉計を用いてパルス幅の測定を行うことにした。以下では外部共振器の試験蓄積の状況と、パルス蓄積のための干渉計製作の取り組みについて発表する。

2. 外部共振器の製作

試験蓄積に用いるファイバーレーザーの仕様は、波長 1030 nm, 繰り返し 20.3MHz (14.8m) である。光学系の確保可能なスペースの事情により倍の周波数の 40.5MHz (1 周約 7.4m) で設計をしている。例えば、パルス幅が 1ps 程度と見積もった場合に共振器の光学系に要求される精度は 0.3mm 以下となるが、使用している検波器は 150MHz 程度でありオシロスコープも 500MHz 程度と測定機側で十分な精度が出ないことから、パルス蓄積のためには機械や設置により精度を高める必要がある。

現在では上記設計の通りに製作が進んでおり、モードロックファイバーレーザーがうまく周回していることも確認されている。

3. 干渉計の製作と測定

FEL のパルス幅を測定するためのマイケルソン干渉計の製作に取り組んでいる。自動駆動ステージを用いてビームスプリッターで分けた二つの光の光路長を変化

させることでパルス光の干渉強度を測定し、その強度変化とステージの駆動距離からパルス幅を求めることができる。

製作の第一段階として、干渉計の調整技術を獲得するために、赤色 CW レーザーを用いて横方向の調整を行っている。具体的にはビームスプリッターで二つに分けたレーザー光を平面ミラーによる長距離輸送でスポットサイズを拡大し、光軸を合わせるといったものである。レーザー光の横方向はコリメーター回折によって生じた干渉波面同士の重なりを利用して調整しており、中心部の高強度の重なりを評価するうえでは十分な精度を出すことができている。調整後の光強度の測定の結果 (Figure 2) から、干渉させる2つの光は若干の傾きがありクロスしていると思われるが、こちらも中心の高強度な部分の重なりは十分であると考え、干渉には問題ないと考えている。

第二段階として、現在のところモードロックファイバーレーザーによる縦方向の調整とパルス長測定に取り組んでいる。まずは自動駆動ステージを動かして縦方向の重なりを探しているが、まだ見つかっておらず (Figure 3)、さらに精度よく追い込むための調整を継続している。

上記の経験をもとにして FEL での様々な運転条件下におけるパルス長を測定しその情報をパルス蓄積に役立てていく。なお、FEL パルス ($>2\ \mu\text{m}$) の測定を行う際は干渉計内の光学素子、特にスプリッターは適切なものに交換する必要がある。

4. まとめと今後の狙い

FEL-HHG によるアト秒紫外、X線の生成には高強度の FEL パルス光が求められており、そのために日大 LEBRA では外部共振器を用いたパルス蓄積による高強度化を目指している。FEL のパルス幅は運転時の条件設定により変化し、共振器の調整にはパルス幅を知っておくと利益があり、それを可能とするために干渉計を製作している。調整及び測定の技術獲得のための可視光 CW レーザーや赤外モードロックファイバーレーザーでの経験をもとに、FEL のパルス長測定を行い、共振器でのパルス蓄積に役立てる。

5. 参考文献

[1] T. Popmintchev et al., “Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers,” *Science* Vol.336, pp.1287-1291, 2012.

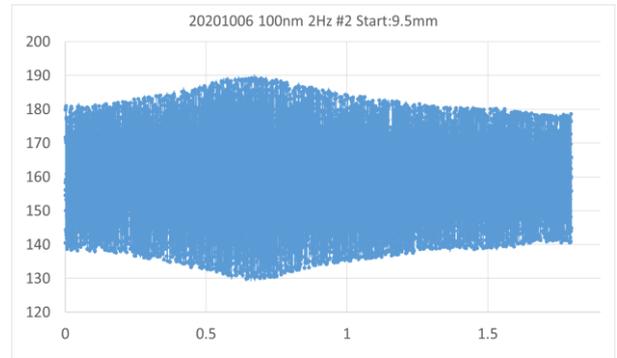


Figure 2. Visible light laser interference waveform.

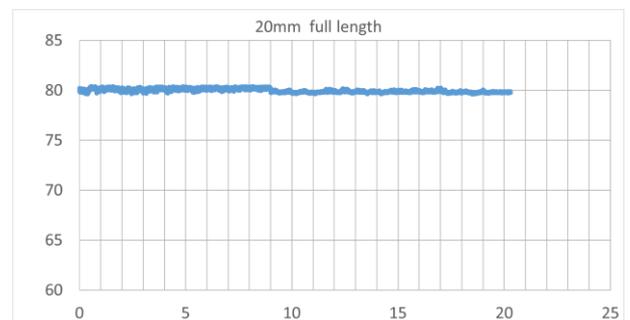


Figure 3. IR mode-locked fiber laser interference waveform.

- [2] N. Nishimori et al., “Sustained Saturation in a Free-Electron Laser Oscillator at Perfect Synchronism of an Optical Cavity,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol.86, pp.5707-5710, 2001.
- [3] R. Hajima and R. Nagai, “Generation of a Self-Chirped Few-Cycle Optical Pulse in a FEL Oscillator,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol.91, 024801, 2003.
- [4] Y. Sumitomo, R. Hajima, Y. Hayakawa, T. Sakai, “Simulation of Short-Pulse Generation from a Dynamically Detuned IR-FEL Oscillator and Pulse Stacking at an External Cavity”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol.1350 012040, 2019.
- [5] Y. Sumitomo et al., “Development of an Enhancement Cavity for Pulse Stacking from IR-FEL Oscillator,” in *Proc. PASJ2019, THPI023*, 2019.
- [6] T. I. Smith, P. Haar, H. A. Schwettman, “Pulse stacking in the SCA/FEL external cavity”, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, Vol.393, pp.245-251, 1997.
- [7] P. Niknejadi et al., “Free-electron laser inverse-Compton interaction x-ray source,” *Phys. Rev. Accel. Beams* Vol.22, no.4, 040704, 2019.