

FEL パルス光の外部蓄積のための試験蓄積状況

TEST STORAGE STATUS FOR EXTERNAL STORAGE OF FEL PULSED LIGHT

黒澤歩夢^{#, A)}, 住友洋介^{A)}, 川瀬啓悟^{B)}, 羽島良一^{B)}, 早川恭史^{A)}, 境武志^{A)}

Ayumu Kurosawa^{#, A)}, Yosuke Sumitomo^{A)}, Keigo Kawase^{B)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}

^{A)} College of Science and Technology, Nihon University

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

Currently, we run a research program to explore the application of the IR-FEL to generate attosecond UV and X-ray pulses through high harmonic generation (HHG) at LEBRA facility of Nihon University. Since a high-peak power and short-pulse duration are needed for HHG, we are trying to stack FEL pulses at an external cavity. Although FEL pulses are not bright enough, we can use a mode-locked pulse fiber laser at 1030 nm for a better test stacking and to help constructing the external cavity. In addition, we are constructing an interferometer to measure the FEL pulse-width at various operating conditions. The FEL pulse-width is an important parameter in order to make a precise adjustment of the external cavity for the pulse stacking.

1. 動機

日大 LEBRA では FEL-HHG (IR-FEL による高次高調波発生) 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 では、中赤外の FEL 光を希ガスへと入射することでアト秒 (10^{-18} s) 領域の紫外、X 線の高次高調波が発生することを狙っている (Fig. 1 参照)。HHG において種光の波長が長いほど出てくる光の波長が短くなるという結果が知られている [1] ことから中赤外のシード光を用いる。また、加速器では高繰り返しで数サイクルのパルス幅を持つ光を生成することが可能であり [2, 3]、これを用いることで高調波も高繰り返しで数サイクルになることが IR-FEL を使う利点である。

HHG は高い FEL 光のピーク強度が必要であり、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]。外部共振器を作るにあたって、20 μ s の FEL 光で調整するには平均強度が弱く調整が困難であるため、モードロックファイバーレーザーによって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 (例えば [6, 7] 参照)、国内では皆無である。また、FEL 光自身も運転時の調整によってパルス幅が変化するので、それに合わせた調整を必要とする。そのためには FEL のパルス幅を知っておくと良いが、ストリークカメラなど高価な測定機器を用意することは難しいので、比較的安価に作成できる干渉計を用いた測定をすることにした。以下では日本大学における試験蓄積の状況と、パルス蓄積に向けた干渉計製作の取り組みを紹介する。

2. 外部共振器の製作

テーブル型光学台にて設計。ファイバーレーザーの仕様は、波長 1030 nm、繰り返し 20.3 MHz (14.8 m) である。しかし光学系の確保可能なスペースの事情から倍の周波数の 40.5 MHz (1 周約 7.4 m) で設計をしている。現在では周回ミラーを透過した漏れ光で検出したピークと

[#] csay19003@g.nihon-u.ac.jp

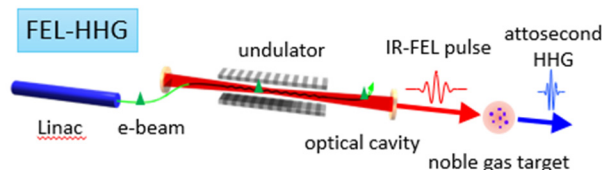


Figure 1: An illustration of the mechanism of FEL-HHG.

そのフーリエ変換から 40.5 MHz で周回していることが確認できている (Fig. 2 参照)。

例えば、パルス幅が 1 ps 程度の場合に光学系に要求される精度は 0.3 mm 以下となるが、共振器に用いている検波器は 150 MHz 程度でありオシロスコープも 500 MHz 程度であることから、パルス蓄積のためには精度が足りない。このような制約が共振器に課されるため、現在のところ設置精度を高めて共振器を構築している最中である。

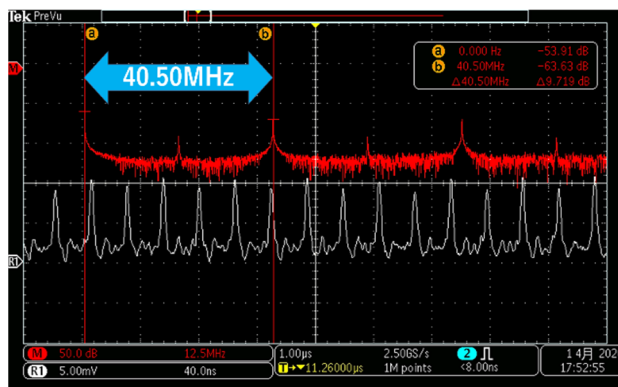


Figure 2: Peak detection and fast Fourier transform of fiber laser signals at the cavity.

3. 干渉計の製作

FEL のパルス幅を測定するための干渉計の製作に取り組んでいる。現在は可視光 CW レーザーを用いて調整、

アラインメントを行っている。これは横方向を合わせることを目的としたものである。具体的には干渉計から出てきた光を平面ミラーを使って長距離輸送しスポットサイズを拡大して光軸の調整に利用している (Fig. 3, Fig. 4 参照)。ここで見えている干渉は干渉計内に設置しているしぼり (コリメーター) や光源自身に由来する干渉であり、横方向の調整はこの程度で十分であると考えられる。この状態で増幅 Si 検出器で干渉強度を測定する。

今後モードロックファイバーレーザーで縦方向でのパルス長測定を試みる予定である。ビームスプリッターは 600 nm~1700 nm までの帯域で利用可能なためファイバーレーザー下でも同じものを使用できる。自動駆動ステージはハーフステップで 1 パルスあたり 1 μm の移動幅であるが、プログラム上でより細かいパルス分割をすることで、50 nm 幅での駆動を可能にしており、干渉計に必要な細かさを十分に満足している。なお、FEL パルス (2 μm ~) の際は光学素子は適切なものに交換する。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ることを目的とする。

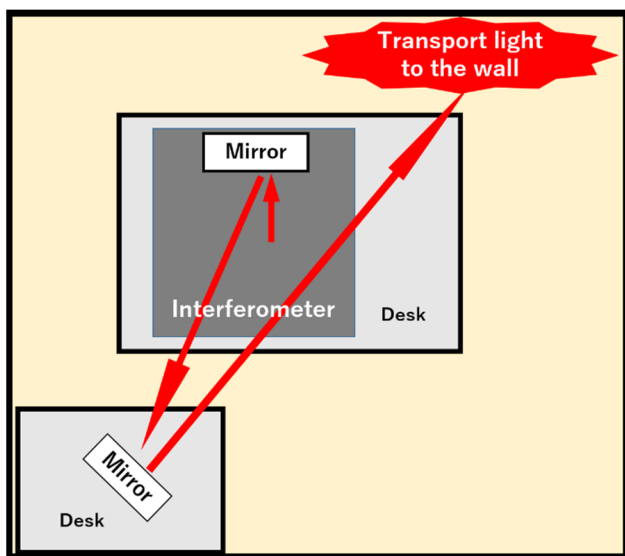


Figure 3: An overview of transverse adjustment.



Figure 4: Interference pattern on the wall.

4. まとめと今後の狙い

FEL-HHG によるアト秒紫外、X 線の発生には高強度の FEL 光が求められる。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。しかし、共振器製作にあたって FEL 光は微弱でありこれによる調整は難しいのでモードロックファイバーレーザーによる試験蓄積を行っている。試験蓄積では周回はできているので、今後はパルスを重ねるための設置精度を高めた調整を行う。

FEL では運転時の条件設定によりパルス幅が変化し、共振器の調整にはパルス幅を知っておくと利益がある。これを可能にするための干渉計を製作している。現在は可視光による横方向の調整とアラインメントをしており、今後はパルスレーザーによる縦方向の調整とパルス幅測定を行う。このようにして得た経験をもとに、光パルスによる干渉波形から 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。

なお、現在のところ、可視光での干渉計の調整における課題として、ステージを駆動させて干渉光を測定した際に、CW レーザーであるにもかかわらずサブミリスケールでの強度変化が激しいことが挙げられる (Fig. 5 参照)。この問題はローパスフィルターを使ったノイズ低減などを試みたが解決しておらず、原因及び干渉計の性能への影響の有無を調査している最中である。なお、横方向の調整はグラフ原点にて行った。

また、Fig. 6 のように Fig. 5 の横軸を拡大すると、ステージの移動距離と光強度の変化は一般的な干渉計の原理

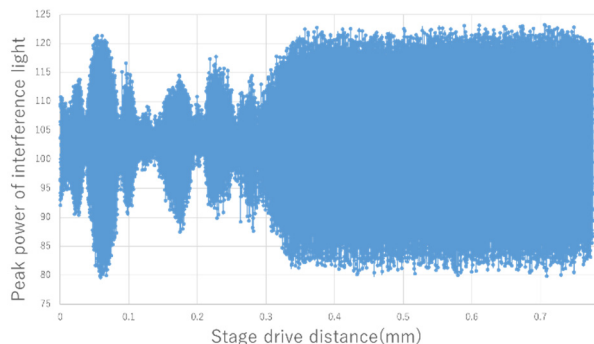


Figure 5: Visible light interference waveform.

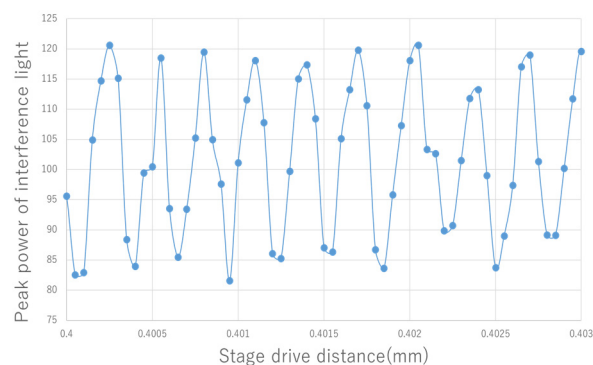


Figure 6: Relationship between stage drive width and interference light intensity.

に沿った変化をしていることがわかる。測定点の横軸の間隔はステージ駆動幅の 50 nm でありピーク間距離はおおよそ 6, 7 区間分となっているため 635 nm の波長に相応である。

なお、昨年度にて、放射線による 30% 程度の減磁があったアンジュレータ磁石の交換を行った。入れ替え後、磁場測定も実施し計算結果と概ね一致していることを確認。アンジュレータ性能確認のために実際に電子ビームを出して試運転を予定していたが新型コロナウイルスの影響や故障があり中断していた。現在調整中ではあるが、FEL の発振が見られる状況になっている。

謝辞

本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)JPMXS0118070271 の助成を受けたものである。

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* 336, 6086, 1287-1291(2012).
- [2] N. Nishimori *et al.*, “Sustained Saturation in a Free-Electron Laser Oscillator at Perfect Synchronism of an Optical Cavity”, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 5707(2001).
- [3] R. Hajima and R. Nagai, “Generation of a Self-Chirped Few-Cycle Optical Pulse in a FEL Oscillator”, *Phys. Rev. Lett.*, 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.*, 1350 012040 (2019).
- [5] Y. Sumitomo *et al.*, “Development of an Enhancement Cavity for Pulse Stacking from IR-FEL Oscillator”, in Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Aug. 2019, THPI023.
- [6] T. I. Smith, P. Haar, H. A. Schwetman, “Pulse stacking in the SCA/FEL external cavity”, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 393 (1997), 245.
- [7] P. Niknejadi *et al.*, “Free-electron laser inverse-Compton interaction x-ray source”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 22, no. 4, 040704 (2019).