

共振器型 IR-FEL パルス蓄積のための外部増幅共振器の開発と試験蓄積 DEVELOPMENT OF AN ENHANCEMENT CAVITY FOR PULSE STACKING FROM IR-FEL OSCILLATOR

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

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

^{A)}LEBRA, Nihon University, Chiba, Japan

^{B)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), Ibaraki, Japan

Abstract

We study a pulse stacking at an external cavity for the enhancement of peak power, where the pulses are generated at the IR-FEL oscillator at LEBRA facility, Nihon U. Advantages of the accelerator based IR light source include a high peak power, a few cycles short pulse width, and a high repetition rate over MHz, that have a great potential to boost the attosecond science area through the high-harmonic generation with a noble gas target. We started constructing the external cavity with an IR mode-locked fiber laser, since the LEBRA-FEL lasing is too short for the tuning of external cavity. We report the present status of the external cavity construction, and make comments for the further developments.

1. はじめに

日本大学では共振器型赤外自由電子レーザー (FEL) を用いて高輝度の光生成を行いユーザー利用に提供している。2018年11月からは、文科省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (MEXT Q-LEAP)、次世代レーザー技術領域」の基礎基盤研究課題「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」に採択され、量研機構と京大、高エネ研のメンバーと連携して取り組んでいる。このプログラムにおいては、FELにおいて発生した赤外光を希ガスターゲットに照射することで高次高調波発生を引き起こし、紫外、または軟X線の生成を狙うものである。過去の超伝導加速器を用いた共振器型FELの研究においては、数サイクルのパルス幅と、高次高調波発生への応用が期待できるパルスエネルギーの実績があり [1,2]、キャリアエンベロープ位相安定化方法とともに FEL 光を用いた高次高調波発生の可能性、またそれを用いたアト秒科学の応用について提案がなされている [3]。近年、次世代のレーザー開発としてアト秒科学を促進させることが求められているが、これに対し、加速器が得意とする MHz 以上の高繰り返しや高輝度中赤外光生成を用いて貢献することを目的としている。なお、高輝度中赤外光は、高次高調波発生を通じて軟X線を含む短い波長の光生成において有利であると考えられている [4]。

高次高調波の生成においてはパルス当たりのエネルギー値が重要となる。共振器型 FEL を用いた中赤外光生成においてパルスエネルギーを上げるには、完全同期長共振が方法としてあげられるが、他の方法として、外部共振器におけるパルス蓄積も考えられる。日本大学では上記プログラムに対して、特に FEL 光の外部共振器でのパルス蓄積の基礎研究を中心に行っていく。FEL 光の外部蓄積自体は、世界において数例が報告されているのみであり (例え

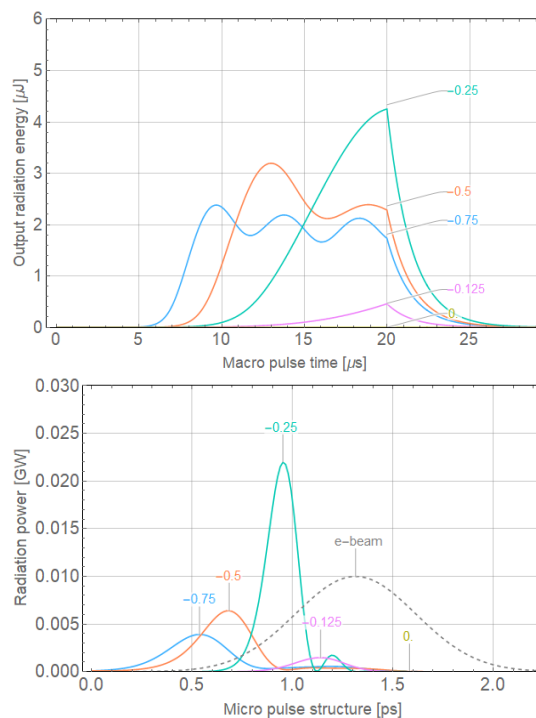


Figure 1: A FEL simulation result respecting the LEBRA low-charge mode operation [7]. The upper figure shows the waveforms of the pulse energy against the pulse train, while the bottom describes the pulse structures at 20 μs . Each assigned number corresponds to the detuning of FEL cavity length in terms of the radiation wavelength $\lambda_r = 4\mu\text{m}$.

ば [5,6])、国内においては日本大学における研究が初の事例となる。なお、超伝導加速器を用いた過去の研究においては、パルスエネルギーで75倍の蓄積が得られている [5]。これに対し、日本大学の加速器では常電導加速管を用いた 20 μs の電子パルス列の加速となり、超伝導加速の場合と比べると

* sumitomo.yoske@nihon-u.ac.jp

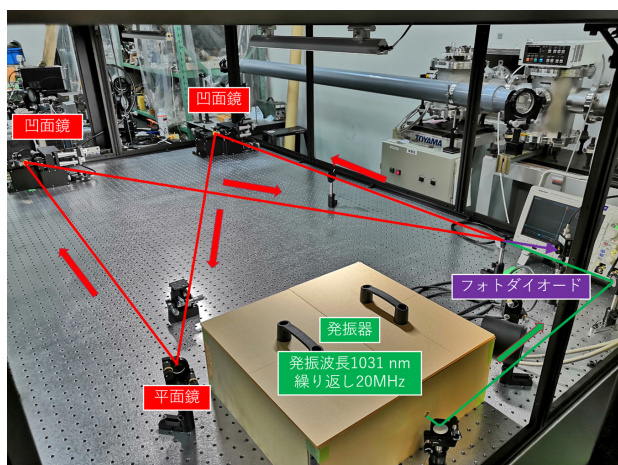


Figure 2: A configuration of the external cavity for pulse stacking.

と蓄積で使えるパルス数が限られてしまうが、限られたパルス数における蓄積の最適化条件を探ることでFEL光のパルス蓄積に関する基礎研究を行っていく。共振器型FELではその共振器長により相互作用の仕方が変化することから蓄積波形やパルス形状が異なるのであるが（日本大学低電荷モード運転時におけるシミュレーション結果 Fig. 1 参照）、日本大学の状況において共振器型FELでの蓄積方法により外部蓄積にどのように影響するのか実験を行っていく予定である。

2. 外部共振器試験蓄積

日本大学では外部共振器の構築を行うため光学台を導入した。外部共振器はスペース上の都合から、FEL共振器長の半分とし、倍の周波数で蓄積を行う。日本大学では $20\mu\text{s}$ での電子パルスストレインによりFEL光が生成されるのであるが、この短いパルスストレインでは共振器の調整に困難が予想される。この為、共振器の調整用として、量研機構において開発されていたモードロックファイバーレーザー（波長1031 nm、パルス幅163.5 fs (FWHM)、繰返し20 MHz）を導入し、外部共振器の構築と試験蓄積を開始した。

実際の構築の様子を Fig. 2 に示す。ここで、発振器から出力された光パルスはスプリッターにより共振器内に入射され、 $R=2\text{ m}$ の凹面鏡と平面鏡により8の字型に構築された光路を周回する。周長はモードロックファイバーレーザーの倍の周波数となるように設計している。

光共振器の蓄積のための調整が進んだ段階で、スプリッターから出てくる光パルスフォトダイオードにおいて電圧波形に変換し、それをオシロスコープにおいて測定した。この際のオシロスコープにて測定された電圧波形を Fig. 3 にて示す。元の光パルスが20.325 MHzでやってくるのに対して、共振器内を周回して出てくる40.650 MHzの信号も測定されているのがわかる。

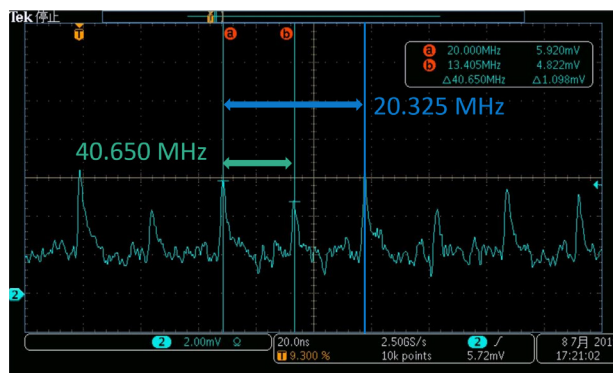


Figure 3: A snapshot of the oscilloscope screen showing the detected signals.

なお、現在は共振器を構築し調整を開始したところであるが、以下のような課題があると考えられる。

- Figure 3 の測定時は雨天が続いたことで実験室内の湿度が非常に高く、モードロックが頻繁に不安定になることから背景信号が強く出てしまっている。
- 入射光と共振器内の周回光の為の条件が完全に揃った状態ではないため、周回数が多くなるほどに共振器とのマッチングが取れなくなってしまっている。
- 共振器の調整のため透過率の高いスプリッターを利用しており、もともと内部の蓄積はさほど高くはならない。

それぞれにおいて今後解決法を検討の上で取り組んでいく予定である。

3. まとめと議論

日本大学では自由電子レーザー（FEL）により生成された中赤外のパルス光の蓄積のため、外部共振器の構築と調整を行っている。短いパルスストレインのFEL光を用いた調整では困難が予想されるため、量研機構で開発されたモードロックファイバーレーザーを用いて調整と試験蓄積を行い、外部共振器内を複数回光パルスが周回している状況を確認した。

現在日本大学のアンジュレーターは大幅な減磁が確認されており、発振は行えるものの設計通りの自由電子レーザーの性能が引き出せているとは言い難い状況である。これに対応するため、今年度中にアンジュレーター磁石列を更新する予定である。また、自由電子レーザーの発振により電子ビームにはエネルギー損失が発生するのであるが、これを測定するため、アンジュレーター下流の偏向磁石後にビーム位置モニターの設置も計画している。

光共振器はスペース上の都合でFEL共振器長の半分のものとして構築している。FEL光の同じ相互作用にて成長する光パルスはFEL共振器長により繰返しが決定されるのであるが、電子パルス繰返しの調整により同時に独立して成長する別の光パルスの生成を行うことは可能である。FEL光自体がランダ

ムなショットノイズを源として成長することから、この独立して成長する別のパルスは一般に異なる位相を持つのだが、これらの独立して成長するパルス同士に位相相関をもたせる方法が提案されている ([6,8] 参照)。位相相関が存在すれば、同時に成長する別のパルスでも外部共振器において蓄積に用いることができ、日本大学のように $20\mu\text{s}$ といったパルストレインに制限がある状況においても効率的に蓄積を行えるようになると期待できる。

謝辞

本研究は文科省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (MEXT Q-LEAP)、次世代レーザー技術領域」により支援を受けている。

参考文献

- [1] 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).
- [2] R. Hajima and R. Nagai, "Generation of a Self-Chirped Few-Cycle Optical Pulse in a FEL Oscillator," *Phys. Rev. Lett.*, 91, 024801 (2003).
- [3] R. Hajima and R. Nagai, "Generating carrier-envelope-phase stabilized few-cycle pulses from a free-electron laser oscillator," *Phys. Rev. Lett.* 119, no. 20, 204802 (2017).
- [4] 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).
- [5] T. I. Smith, P. Haar, H. A. Schwettman, "Pulse stacking in the SCA/FEL external cavity", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 393 (1997), 245.
- [6] P. Niknejadi *et al.*, "Free-electron laser inverse-Compton interaction x-ray source," *Phys. Rev. Accel. Beams* 22, no. 4, 040704 (2019).
- [7] Y. Sumitomo, R. Hajima, Y. Hayakawa and T. Sakai, "Simulation of Short-Pulse Generation from a Dynamically Detuned IR-FEL Oscillator and Pulse Stacking at an External Cavity," in *Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, May 2019, paper TUPRB041, to appear in J.Phys.Conf.Ser.* (2019).
- [8] D. Oepts *et al.*, "Induced and Spontaneous Interpulse Phase Locking in a Free-Electron Laser", *Phys. Rev. Lett.* 68, 24, 3543 (1992).