

中赤外光周波数コム自由電子レーザーのための 試験調和共振器を用いた精密調整方法の検討

A STUDY OF ACCURATE ALIGNMENTS FOR MID-IR FREQUENCY COMBS FEL WITH A TEST HARMONIC RESONATOR

原田一輝^{#, A)}, 住友洋介^{A)}, 飯田翔之介^{A)}, 根本妃那^{A)}, 島貴蒼^{A)},
境武志^{B)}, 早川建^{B)}, 早川恭史^{B)}

Kazuki Harada^{#, A)}, Yoske Sumitomo^{A)}, Shonosuke Iida^{A)}, Hina Nemoto^{A)}, So Shimanuki^{A)},
Takeshi Sakai^{B)}, Ken Hayakawa^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)}

^{A)} CST Nihon University

^{B)} LEBRA Nihon University

Abstract

The oscillator free electron laser at Nihon University can generate high-intensity mid-infrared light pulses at a high repetition rate of 2.856 GHz and holds the potential to pioneer new areas of physics closely related to the absorption bands of many molecules, including hydrogens. We are developing technologies that utilize nonlinear effects induced by high-intensity, ultra-short light pulses to enable molecular manipulation including high-efficient hydrogen generations from waters. To address the high difficulty of the required adjustments, we are establishing procedures for precise tuning of the resonant state consisting of three concave mirrors by using a test resonator. In this presentation, we will report on the current status of our research using the test resonator, especially after increasing the number of rounds by a splitter change.

1. はじめに

近年、フラッシュ放射線治療やアト秒レーザーなどといったパルスを利用した技術開発が進められている。また光パルスレーザーを用いることで、従来に比べピーク強度を飛躍的に向上し、理論的には予測不能な非線形現象が起こすことができると期待されている。

日本大学の電子線形加速器では、100 MeV 以下の高エネルギー電子ビームで、約 3 GHz の高繰り返しで最大 20 μ s のマクロパルス生成を行うことができる。この特徴を活かして、2~5 μ m の中赤外波長領域で 100 フェムト秒以下の短い単色光パルスの基本波発振を得意とする共振器型自由電子レーザーが可能となっている。中赤外の波長領域は水素を含む多くの分子の吸収帯域であることから、この領域の高ピーク強度光パルスには新奇分子反応の開拓の可能性を秘めている。現在のところ、高強度極短光パルスによる非線形的効果を利用し、水素を始めとした分子操作を可能とするための高繰り返し光周波数コムの技術開発を進めている[1, 2]

2. 高輝度・高繰り返し光周波数コムの開発

2.1 高輝度・高繰り返し光周波数コム

分子反応における非線形現象を誘発させるためには、高輝度かつ結合に対応した吸収エネルギーの帯域に整合した波長領域の中赤外レーザーを照射する必要がある。光のピーク強度を上げるには極短パルスが適切であるが、極短時間幅による周波数広がりが生じてしまうことから、分子に特有な吸収エネルギー成分強度が弱くなってしまいうという難題が伴ってしまう。そこで、吸収波長に周波数成分を集中させるために、共振器型自由電子レ

cskz25021@g.nihon-u.ac.jp

ザーを応用発展させ、光周波数コムとして光パルスを高度化することを計画している。光周波数コムについての概要図を Fig. 1 に示す。光周波数コムは、光パルスを繰り返し発生させることを利用しており、周波数空間においては離散的な周波数成分を持つことから、エネルギーを離散部分に集中させることが可能となり、必要な周波数成分を飛躍的に高められる方法である。一般的にレーザーでは繰り返しを上げるとピーク強度が大きく減衰してしまうことが知られているが、加速器においてはその加速方法から高い繰り返しでの電子パルスを生成することが可能であり、また、共振器型自由電子レーザーにおける非線形増幅効果により高ピーク強度の光パルス生成が可能となる。特に、日本大学の電子線形加速器では、中赤外領域での基本波発振が可能であることから、約 3 GHz もの高繰り返しで、非常に高いピーク強度をもつ光周波数コムの生成が大きく期待できる。

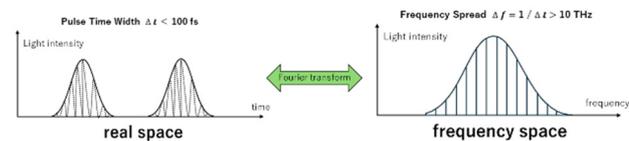


Figure 1: Overview of optical frequency comb.

2.2 位相同期システムの構築

中赤外の波長域でフェムト秒程度の時間幅の光パルスでは、光周波数コム化するにあたり光パルス間の位相が一致していないと目的の特性周波数成分の強度増強は望めない。しかし、日本大学の電子線形加速器では電子ビームからレーザーが生成され、各光パルスの位相は電子パルス生成時のショットノイズに起因するため、基本的にパルス間は独立しており位相に相関がない。そこで、位相に相関を持たせるために位相同期システムを構

築する必要がある。具体的には、共振器内から一部のパルスを取り出し、経路差を設け、曲率の異なる 3 枚目の凹面鏡を設置することで、光パルス間の相関により位相の同期を行うことができる (Fig. 2 参照)。この位相同期方法については、位相同期自由電子レーザー [3-5] として提案・実証されており、本研究においては、この位相同期法を日本大学の加速器の特徴である長いマクロパルスに適用することで、高繰り返し中赤外光周波数コムへと応用するものである。

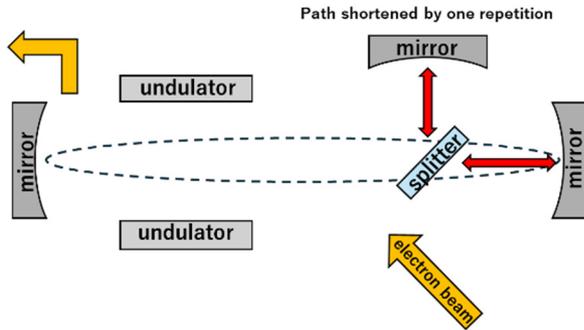


Figure 2: Overview of a phase synchronization systems to be installed at the FEL.

3. 試験調和共振器の作成

位相同期システムは 3 枚の凹面鏡から構成され、どの任意の 2 枚の組み合わせでも共振器が成り立つ必要があり調整に難が予想される。そこで、はじめに試験的な共振器を作成し、調整方法を確立した後、実際の加速器内の共振器に設置する流れで実験を行うことを計画している。今回利用しているスプリッターについて、以前は反射と透過の比率が等しいものを利用していましたが、反射と透過の比率を 3:7 になるものに変更することで共振器内での周回数が向上するように変更した。試験共振器を構築する凹面鏡のうち 2 枚については、実際の日本大学の加速器で用いている凹面鏡と同様の赤外光への利用に適した R3700 mm の金コートミラーを利用し、位相同期させるための 1 パルス間分ずらした位置に設置する曲率の異なる 3 枚目の凹面鏡については、ガウシアンビームの転送行列から計算し、R3653 mm を使用している。また、共振器長については実際の加速器の共振器長 (6718 mm) と同等になるように作成し、その概要を Fig. 3 に示す。

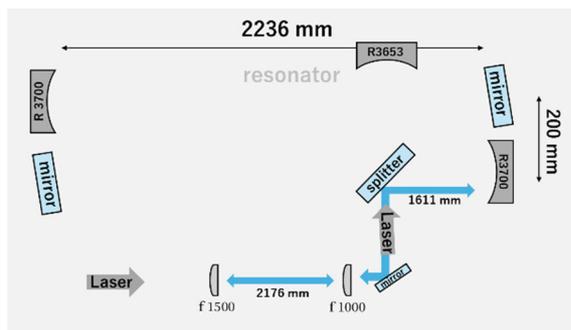


Figure 3: Overview of a test harmonic resonator with three concave mirrors.

3.1 入射光学系レンズ

まずは、試験共振器の横方向の位置精度を追求するため、可視光波長 532 nm の CW レーザーを用いた調整を行っている。入射系の調整には 2 つのレンズ f1000 と f1500 の 2 枚を用いて調整を行う。レンズを置く位置については収束点で収束するように転送行列を組み設置する (Fig. 3) [6]。また入射系を調整するために、はじめに共振器内におけるビームサイズを指標に調整を行った。調整に用いるビームサイズは、共振器の安定化条件から求められた理論値のビームサイズを距離 z に応じて比較していく [6]。

3.2 ビームサイズ比較

実験の手順として 2 枚の凹面鏡における調整を行った後に 3 枚目の凹面鏡を 2 枚の凹面鏡でのビームプロファイルに合うように設置する。ビームサイズは凹面鏡からの距離 500 mm の位置を基点としてピクセルサイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 、CCD センサのカメラを用いてデータを取得し、ガウス分布で近似したときの標準偏差を求めてガウスビームのビームサイズ w に変換し、共振条件から求められる理論値と比較する。比較結果を Fig. 4 に記載する。

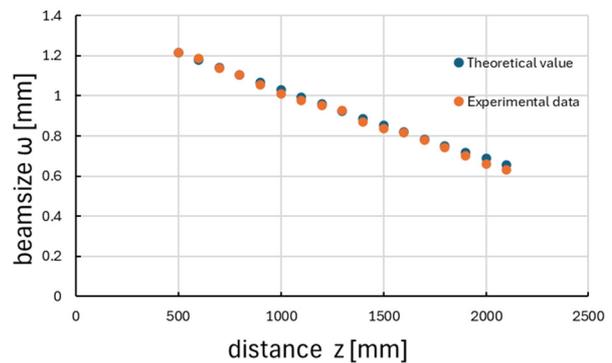


Figure 4: A comparison of beam sizes with respect to several distances from a concave mirror.

3.3 2 枚凹面鏡の蓄積最大化

上述のようにビームサイズが理論値に合うところとなるよう調整を行ったあと、共振器内に光を多く閉じ込めるために光強度が最大化するように入射系のレンズを動かし調整を行った。2 つの場合での強度の比較を Fig. 5 に示す。

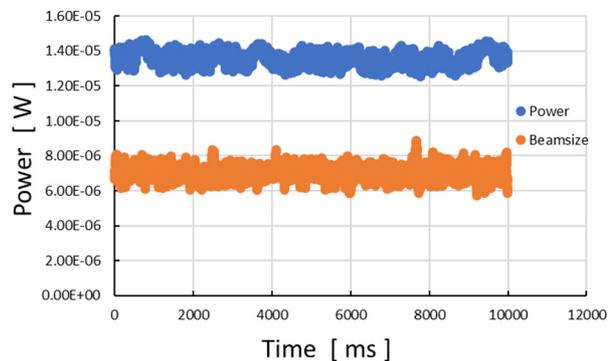


Figure 5: A comparison of accumulated laser intensities inside the laser resonator consisting of two concave mirrors.

す。理論値に合っている段階では理想的な円形のガウスビームと近似したうえで理論値となるよう調整を行っているが、実際には若干の誤差や光強度分布の不均一性が存在していることから、入射系のさらなる調整により近似的な誤差が原因と考えられる。

3.4 3枚目の凹面鏡の導入

2枚凹面鏡で調整が行えたことから、3枚目の凹面鏡を導入し3枚の凹面鏡での共振器を構築する。置く位置については、往復で1パルス(10.49 mm)経路差ができるように設置する。2枚の凹面鏡での強度と3枚での凹面鏡での強度の比較をFig. 6に示す。3枚凹面鏡においては光強度が干渉により大きくぶれる。そのため、高精度での調整が必要となる。

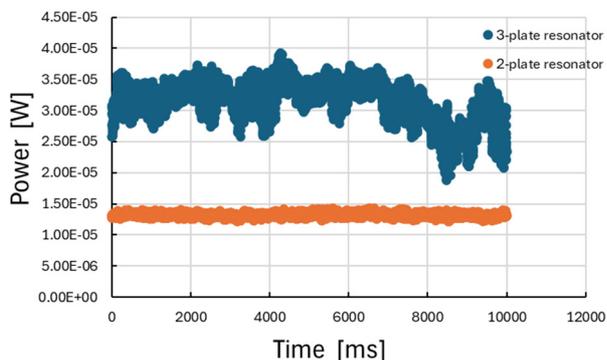


Figure 6: A comparison of accumulated laser intensity between the two-mirrors and the three-mirrors resonators.

3.5 光の干渉

光を取り出す凹面鏡を波長(μm)レベルで動かすことにより、光の干渉を確認するための準備実験を行った。光を取り出す凹面鏡にピエゾ駆動のステージ、ひずみゲージリーダ付きピエゾコントローラーを設置することにより、凹面鏡を波長(μm)以下で動かすことが期待できる。強度を比較した結果を Fig. 7 に示す。どちらの場合でもゆらぎが存在しており、より高い精度で調整の必要性がある。

4. まとめ・今後の展望

水素生成の効率を飛躍的に向上させることを目標に、短時間集中照射することで、分子操作を可能とする非線形反応の可能性を探るために自由電子レーザーの光周波数コム化に取り組んでいる。

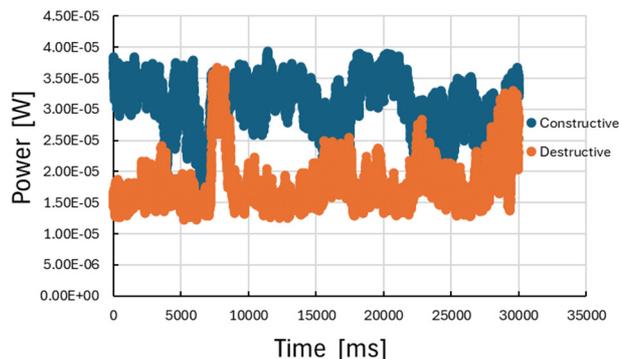


Figure 7: A comparison of laser intensity for different resonator lengths.

今回の実験結果からは、共振器内に多くの光を閉じ込めるのに必要となる第1段階での調整方法を確立させることができている。今後は、透過の比率のより大きなスプリッターを用いて、共振器内での光の周回数を向上し、より精度良く光を周回させることを行っていく予定である。また、実際の加速器を用いても、水素関連分子への照射実験の準備も進めて行く予定である。

謝辞

本研究は、令和7年度日本大学理工学研究所外部資金獲得(スタートアップ)支援研究助成金により支援されています。

参考文献

- [1] 久保田月野 他, PASJ2024 THP060.
- [2] Y. Sumitomo *et al.*, JACoW LINAC2024 (2024), TUPB095.
- [3] Eric B. Szarmes, Stephen V. Benson, John M.J. BADEY, "Mode control on short-pulse FELs using a Michelson-mirror resonator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 296, Issues 1-3, Pages 98-109, (1990).
- [4] D. Oepts, R. J. Bakker, D. A. Jaroszynski, A. F. G. van der Meer, and P. W. van Amersfoort, Phys. Rev. Lett. 68, 3543 (1992).
- [5] Pardis Niknejadi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 040704 (2019).
- [6] Y. Honda, "レーザーと先端光源加速器", Accelerator Fundamentals and Applications of Energy-Recovery Linacs Chapter 6, OHO, 2015.