

中赤外自由電子レーザーの光周波数コム応用のための試験共振器の構築と評価 Construction of A Test Resonator for Frequency Comb Applications of Mid-Infrared Free Electron Laser

○久保田月野¹, 住友洋介², 曾我怜大³, 原田一輝³, 境武志⁴, 早川建⁴, 早川恭史⁴

*Tsukino Kubota¹, Yoske Sumitomo², Reo Soga³, Kazuki Harada³, Takeshi Sakai⁴, Ken Hayakawa⁴, Yasushi Hayakawa⁴

Abstract: The electron linear accelerator at Nihon University can produce a 100 MeV electron beam, from which femtosecond mid-infrared pulsed lights can be generated by using a resonator. The mid-infrared pulsed lights produced by this accelerator are characterized by a high brightness and the high repetition rate of about 3 GHz. Together with these characteristics, we plan to upgrade our oscillator free electron laser system to equip an additional option generating mid-IR frequency combs. We report on developments of a test harmonic resonator that is necessary to make the design evaluation for the upgrade.

1. 日本大学の共振器型自由電子レーザー

日本大学には電子線形加速器があり、電子を光速まで加速させることにより放射線や放射光を生成し、材料解析や照射実験を行うことができる。加速器の上流では電子が加速され、下流には共振器型自由電子レーザー装置がある。この共振器型自由電子レーザー装置は、2枚の凹面鏡から構成される凹面鏡と周期的な磁場を持つアンジュレータから構成されており、電子ビームが共振器内を通過する際に周期磁場と相互作用することにより高輝度な中赤外光パルスを生成することができる。この中赤外パルス光の1つのパルス幅は百フェムト秒以下で約3GHz程度の繰り返しを持ち、時間幅が短くエネルギーの高い中赤外領域の光パルスを生成できることが日本大学の共振器型自由電子レーザー装置の特徴である。

2. 極短光パルスによる新たな分子制御の可能性

地球温暖化や異常気象など環境の変化に影響を与えず持続可能な社会を目指すために新たなエネルギーの発見や開発が必要とされるなか、水素はエネルギー生成の際にも温暖化に寄与しない水となるので新たなエネルギー源としての注目が集まっている。現在の主な水素の生成方法は電気分解が行われているが、生成効率が悪く水素をエネルギーとして使うことにはまだまだ課題がある。そこで水素生成に関しての新たなアプローチとして加速器で生成される中赤外の極短光パルスを用いた生成方法を考えている。

太陽光により水素生成を促進する研究などが多くされているが、本研究では水全体の励起ではなく分子運動の励起を狙う。水やアンモニアなどの水素関連分子は、分子運動の固有吸収スペクトルを中赤外領域に持つ。ここで、日本大学の自由電子レーザーで生成され

る光パルスは2~5umの中赤外領域であり高輝度で高繰り返しである。この自由電子レーザーを水分子に瞬間的に集中照射することにより線形的な励起ではなく非線形的な反応を引き起こし、分子操作によって水素の超効率生成を目指す。

3. 高輝度極短レーザーの開発

3.1 光周波数コムの開発

自由電子レーザーを照射し非線形的な反応を引き起こすために、水素関連分子が持つ吸収帯と同じ周波数のレーザーを照射する必要がある。特定の吸収スペクトルにおける光強度を大幅に増加させる方法として、光周波数コムの性質を利用する。光周波数コムの概要図をFig. 1に示す。

時間と周波数の逆数の関係から光パルスをスペクトルとして見るができるが、このときパルスの時間幅はスペクトル広がりに関係があり、また、繰り返し数が多いほど波の性質として特定の周波数成分の単色性が高くなる。日本大学の自由電子レーザーでは最大20usの間持続した加速が可能であり、約3GHzという高繰り返しの特性を活かした中赤外光周波数コムの生成に適している。

3.2 位相同期システムの構築

共振器型自由電子レーザーでは極短光パルスの生成過程で、共振器内部の凹面鏡で光パルスを往復させ、入射される電子ビームと光パルスを相互作用させることにより非線形的に光パルスを成長させ強度を高めている。現在、この往復している光パルスには位相同期性が無く周波数成分に変換したとき綺麗なコム状にはならない。そこで位相同期システムの構築を検討してい

1: 日大理工・院(前)・物理 2: 日大理工・教員・物理 3: 日大理工・学部・物理 4: 日大・教員・量科研

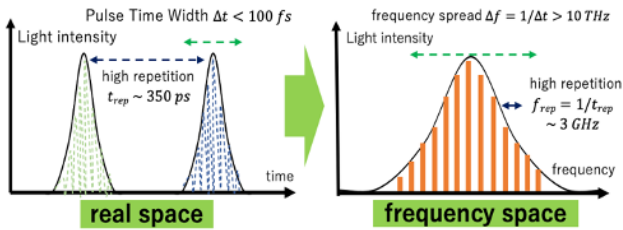


Figure 1: An overview of optical frequency comb [1].

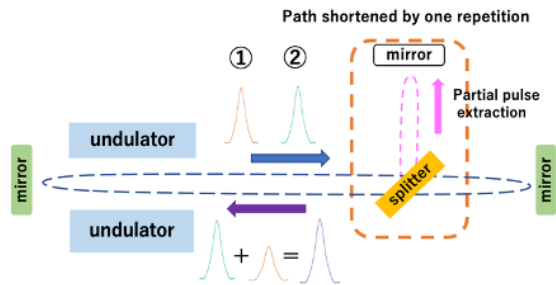


Figure 2: A schematic of the oscillator FEL [1].

る。位相同期システムの概要図を Fig.2 に示す。現在の2枚の凹面鏡に加え3枚目の凹面鏡を追加し経路差を利用し共振関係を築くことにより、光パルスそれぞれに相関を持たせる。この仕組みは、位相同期自由電子レーザー^[2-4]として提案・実証されている。

4. 試験共振器の作成

位相同期システム構築の準備段階として試験的な共振器の作成を行う。加速器内部で使われている共振器部に用いられている R3700 の凹面金コートミラーと同様のものを2枚用意し、位相同期システムに必要な3枚目の凹面鏡の曲率をガウスビーム^[5]から導出する。

$$E = E_0 \exp\left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left(\frac{-ikr^2}{2R(z)} + i\varphi\right) \quad (1)$$

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \quad (3)$$

凹面鏡の曲率は、(2)式のRから求められ、加速器内部の共振器長6718mmから追加経路部の3枚目の凹面鏡の曲率はR3653と求められた^[6]。

試験共振器の光学台の骨組みとして、従来使われるブレッドボードではなく費用を減らすために、光学レールを購入しそのレールを固定するための枕木を3Dプリンターで印刷し作成した。試験共振器の概要図を Fig.3 に示す。

5. 試験共振器の性能評価

最終的なレーザー強度を高めるためには、共振器内に多くの光パルスを閉じ込められるかが重要になる。

そこで、試験共振器を製作し、共振器としての性能評価を行う。

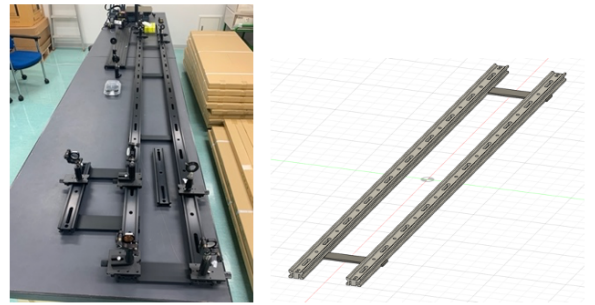


Figure 3: A photo drawing a part of the pilot harmonic resonators.^[6]

共振器内に入射するレーザーは、最終的には中赤外領域の自由電子レーザーだが、試験共振器の調整のために緑色の可視光レーザーを用いて調整を行なっている。共振器内での周期境界条件を満たすためには、入射光がもつプロファイルが共振器の条件と一致しないといけない。そこで入射系として、転送行列とガウスビームの関係から計算し、レンズを導入することにより構築した^[2]。入射したレーザーの曲率をビームサイズを測定することにより、求め入射系の精度を高める必要があるが、レンズの種類や実験室に収まる現実的な系を考える必要があるので必要に応じた議論を行なっている。本報告では、現状の試験共振器の構築状況を中心に発表を行う。

6. 参考文献

- [1] T. Kubota *et al.*, “高繰り返し中赤外光周波数コム開発に向けた試験位相相関実験”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 - September 1, Chiba, Japan, 2023.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Pardis Niknejadi, *et.al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 040704 (2019).
- [5] 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.
- [6] T. Kubota *et al.*, “中赤外自由電子レーザー光パルス間位相同期システム開発に向けた試験調和共振器の構築”, Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 2, Yamagata, Japan, 2024.