

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

AN EXPERIMENT OF INDEPENDENT LIGHT PULSE INTERACTIONS FOR A HIGH REPETITION MID-IR FREQUENCY COMB

久保田月野^{#, A)}, 住友洋介^{A)}, 野津凱^{A)}, 濱野央芽^{A)}, 長瀬敦^{B)}, 境武志^{B)}, 早川建^{B)}, 早川恭史^{B)}
Tsukino Kubota^{#, A)}, Yoske Sumitomo^{A)}, Gai Notsu^{A)}, Oga Hamano^{A)},
Atsushi Nagase^{B)}, Takeshi Sakai^{B)}, Ken Hayakawa^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)}

^{A)} CST, Nihon University

^{B)} LEBRA, Nihon University

Abstract

The free electron laser system at Nihon University can emit highly bright mid-infrared pulsed lights with a short pulse duration. It is rare to find a facility that can emit mid-infrared synchrotron radiations with such high brilliance, and when, it has the potential to induce nonlinear reactions by irradiating them with energy concentrated on their natural frequencies. In particular, to enhance the performance, we are planning to develop a device that concentrates the intensity on a specific frequency component by a high repetition rate optical frequency comb by synchronizing the intrinsic phases between pulse generated at about 3 GHz repetitions. As a preparatory step, we are currently developing a phase correlation test system to enhance the performance of the device. In order to detect the interference between different pulses, it is necessary to set up a delay path for pulse time durations of 100 fs or less.

1. はじめに

近年電子ビームや光などの量子ビームをパルスとして利用することによる技術革命が起こり始めている。例として、加速器により生成される強い放射線をミリ秒程度のパルスとして放射する放射線パルス治療（フラッシュ）などが挙げられる。このパルスによって引き起こされる現象として、これまでの積み重ねを基本とする線形効果とは大きく異なる現象が観測されており、次世代放射線治療として大きく期待されている。通常の線形効果を超えた非線形効果として引き起こされる現象は、集団効果や複雑な事象により理論的な事前の予想が難しく、技術発展によって実験が可能になった近年になって発見され始めている。こういった非線形的な現象がこれからも観測されることは想像に難くなく、これまでの限界を超えるようなパルス応用技術の育成が重要である。

日本大学の加速器には共振器型自由電子レーザー装置があり、100 MeV 以下の電子ビームを用いて2~5 μm の波長領域で 100 フェムト秒以下の短い単色光パルスの生成を得意とし、加速器光源において水素関連分子の励起に関する中赤外帯域での基本波発振を行えることは、特筆すべきことである。本研究では、これまでに観測されていない反応を起こしうる高強度な光パルスを用いて、水素に関連した分子反応を高い効率で制御を可能とする技術を確認し、水素関連分子の非線形反応を確認することが目的である。特に、水素関連の固有エネルギー集中照射による分子操作で水素の超効率生成を目指す。

2. 光周波数コムと位相同期システム

2.1 高繰り返し光周波数コム

中赤外の光振動数領域は、多様な吸収スペクトルが

存在する領域である。特に、水素を結合に持つ C-H、O-H、N-H 伸縮は2~4 μm 程度の波長領域内に吸収帯域が存在している。この中赤外の領域において、短時間幅、高繰り返しの光パルス生成により、光周波数コムを活用することが可能となっている。ここで、光周波数コムについての概要図を Fig. 1 に示す。光周波数コムの性質として、特定の周波数の光強度を高められるという利点がある。これは、短い光パルスはその時間幅の逆数の

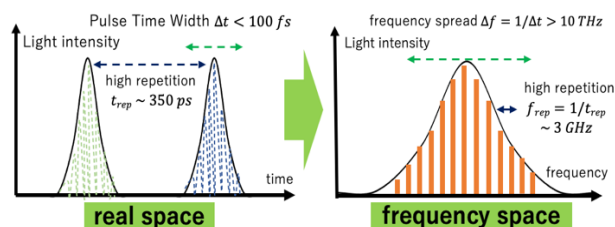


Figure 1: Overview of optical frequency comb.

周波数広がりを持ち、高繰り返しの光パルスでは重ね合わせの結果として離散的な周波数成分となり、分散部分にそのエネルギーが集中し各成分の強度が大きくなるのが要因である。分子は伸縮や回転に従った固有の振動モードを持っており、光周波数コムを用いることによってそれらを大きく励起することで特定の分子構造に反応を促すことが可能となる。水素関連分子に対する反応として、熱的緩和よりも短い時間での集中励起により、これまで従来の光源や熱的反應では難しいとされてきた特定の励起に関する非線形現象解明のきっかけとなり得る。

日本大学の加速器には先ほど説明した通り共振器型自由電子レーザー装置があり、連続可変波長でピーク強度として 10 MW を超える高輝度、また約 3 GHz の高い繰り返しで 3 万弱からなる光パルス列生成が可能となっている。中赤外の発振に対して固体レーザーでは、波長変換が用いられるがその変換効率の低さからエネ

[#] csts23011@g.nihon-u.ac.jp

ルギーの大きな減少が伴う。再度繰返しになるが、加速器光源にて水素関連分子の励起に関する中赤外帯域での基本波としての発振が行えることは大きな特徴であり、今回の非線形現象への解明にうってつけであると言える。

2.2 位相同期システムの構築

日本大学の共振器型自由電子レーザーでは、2枚の凹面鏡により往復13.4 m程度になるように共振器が構成されており、共振器内を周期時間回路で生成・増幅された光パルスが周回する。この光パルスは往復間隔でやってくる電子パルスと逐次的に相互作用することにより、電子ビームからエネルギーを受け取り、指数関数的な増幅をし、高強度の短時間幅光パルスを生成する。電子ビームが約3 GHzで運転される時は、共振器内で128個のパルスが独立して成長するが、その位相は電子ビームのショットノイズに依存しており、パルス間に位相同期性が存在していない。本研究では、この128個の独立するパルスに位相同期性を持たせるため、Fig. 2のように共振器内にスプリッターを設置しそれぞれのパルスの一部を取り出し、1繰り返し分短い経路で共振器内に戻すことを計画している。

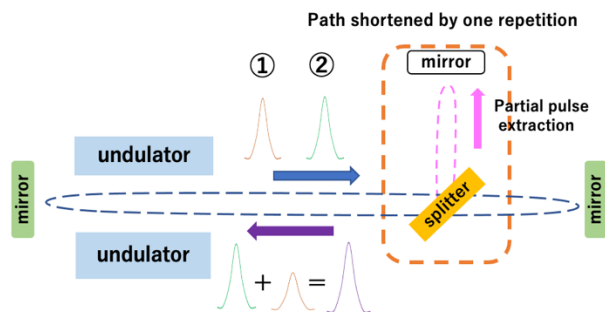


Figure 2: Resonator overview.

この仕組みは位相同期自由電子レーザー[1-3]として提案・実証されている。光周波数コムの生成においても、短いパルスでは少ない波長の繰り返しからなるため、高繰り返しでの重ね合わせによる光周波数コムの特性を引き出すためには位相同期が不可欠となってくる。

3. 研究準備

位相同期システム構築の準備段階として、簡易的な装置を用いて遅延経路を設置した干渉系を組み立て、自由電子レーザー (FEL) の干渉実験を行なう。干渉系の概略は Fig. 3 に示す。

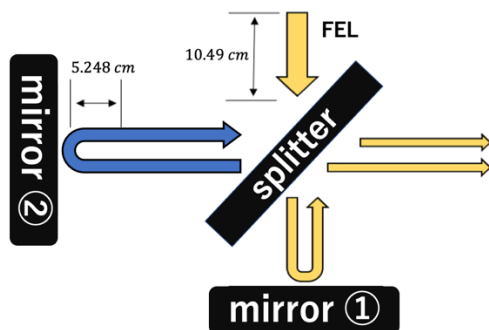


Figure 3: Overview of interference systems.

干渉した FEL の測定には InGaAs と HgCdTe の光増幅ディテクターを用いた。まず、FEL での干渉を確認する前に赤色の可視光を用いて、干渉経路の状態を確認する。可視光を用いることにより、本来目では確認することのできない FEL の発振経路に、可視光を合わせるだけで干渉経路を確認できるという利点がある。ミラーの角度を調整し可視光での干渉経路を確認後、mirror ② を動かし遅延経路を設定する。mirror ② の移動距離は、光経路が往復していることから1繰り返し分の半分の距離になるので周波数 2.856 GHz、光速を 2.9979 m/s として計算すると、5.248 cm 遅延方向に移動する。遅延経路を用いた干渉の確認方法としては、1繰り返し分を目視で確認してから移動したのち、モーターを用いて最小 0.05 μm 間隔で動かしながら測定し、1繰り返し分を正確に移動した位置を探す。

4. 干渉実験の結果

今回 FEL での干渉実験はそれぞれ 6 月 22 日、6 月 29 日、7 月 18 日の計 3 回行なった。6 月 22 日のデータを Fig. 4 に示す。加速器運転時の出力波長は 2.48 μm 、RF 出力の時間幅は 10 μs で、FEL のバックグラウンドを InGaAs ディテクター、干渉測定は HgCdTe ディテクターを用いて測定を行なった。測定の際 FEL の光量が多く干渉経路以外の反射光も検出してしまい、ノイズが多かった。結果グラフのガタ付きが大きくなり干渉を確認することができなかった。

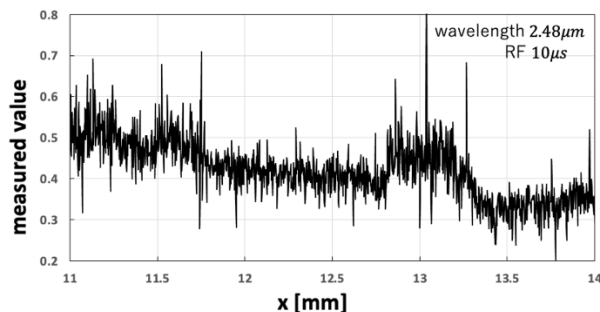


Figure 4: Interference result (June 22).

次に、6 月 29 日のデータを Fig. 5 に示す。運転時の出力波長は 2.42 μm 、RF 出力の時間幅は放電を起こしやすくなった RF を安定化させるため、短い時間幅の 9 μs で運転を行なった。また、干渉した光測定の精度を高めるために FEL のバックグラウンドを HgCdTe ディテクター、干渉測定を空間分解能の高い InGaAs ディテクターに変更し測定を行い、強度が十分強いので減光フィルターを用いて、ディテクターに検出される光を絞った。結果は、発振幅縮小により発振強度に大きなばらつきが出て FEL が発振する際の初期ノイズが多く乗ってしまい、干渉を確認することができなかった。

最後に、7 月 18 日のデータを Fig. 6 に示す。運転時の出力波長は 2.45 μm 、RF 出力の時間幅は測定時間が伸びてしまうが初期ノイズを減らすために 12 μs で運転を行なった。測定は前回と同じ FEL のバックグラウンドを HgCdTe ディテクター、干渉測定を空間分解能の高い InGaAs ディテクターを用いた。干渉の結果として、大き

なノイズを減らすことには成功したが、細かいノイズを減らすことができず、干渉を確認することはできなかった。

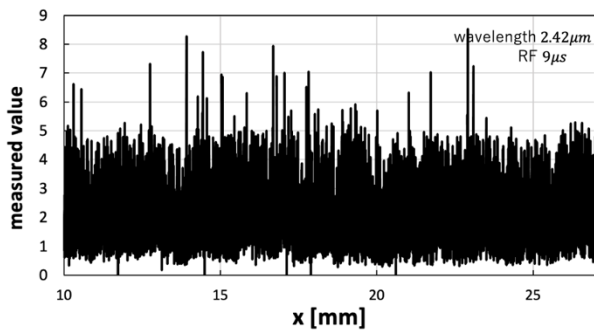


Figure 5: Interference result (June 29).

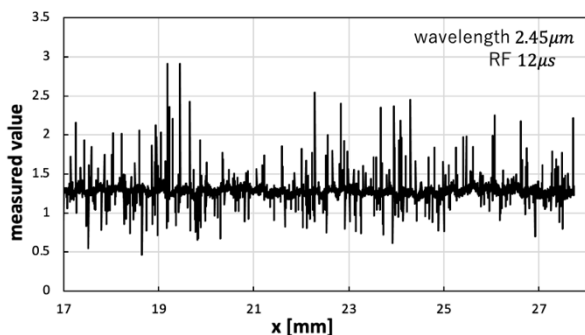


Figure 6: Interference result (July 18).

5. パルス干渉の考察

今回の研究では、フルバンチモードの FEL を用いて実験を行なった。フルバンチモードでは、128 個の独立するパルスが存在する。干渉が起こった際の波形を Mathematica で計算し、実験結果との比較を行う。まず、遅延経路を用いなかった場合の自己パルスによる相関を Fig. 7 に示す。自己パルスによる相関の場合、干渉を綺麗に確認できることが図より理解できる。

次に、遅延経路を用いた場合の 2 つの他パルスによる相関を Fig. 8 に示す。干渉を確認することはできるが、独立した位相のパルスを含むため綺麗な sin 波を確認することはできない。

最後に、今回の実験で用いた 128 個の独立パルスによる他パルスの相関を Fig. 9 に示す。Fig.8 の 2 つの場合の他パルス相関と比較すると、干渉が打ち消しあっているため干渉を確認することが難しく、現状の測定器の熱雑音を含むノイズを限りなく除去しない限り、干渉を測定することは難しいことがわかった。

6. まとめと今後の展望

遅延経路を用いた場合の干渉を確認するためには、光増幅ディテクターの熱ノイズなどの測定の際発生するノイズをさらに抑え込む必要があると計算結果より判明した。今後は試験共振器を作成し、ビームプロファイルを用いた干渉調整を行う予定である。

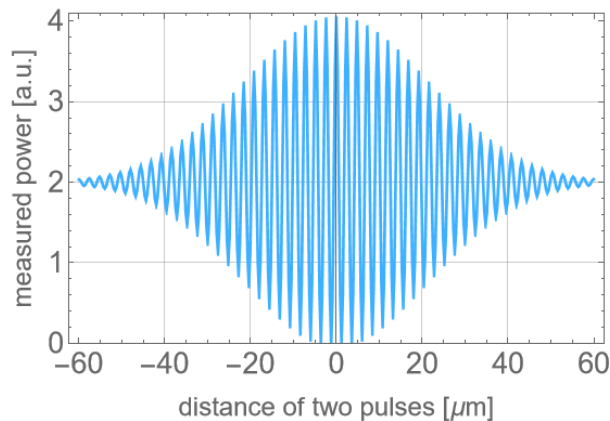


Figure 7: Self pulse correlation.

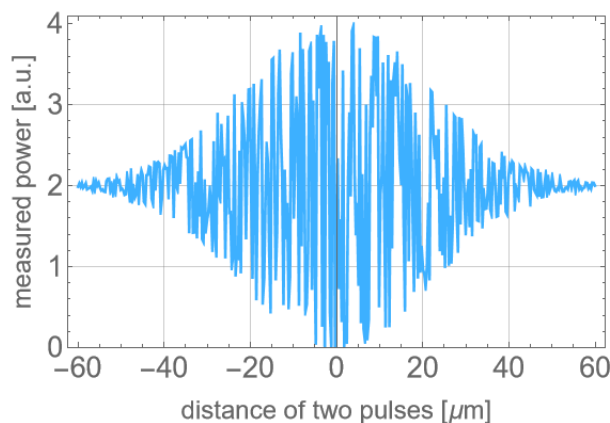


Figure 8: Two other pulse correlations.

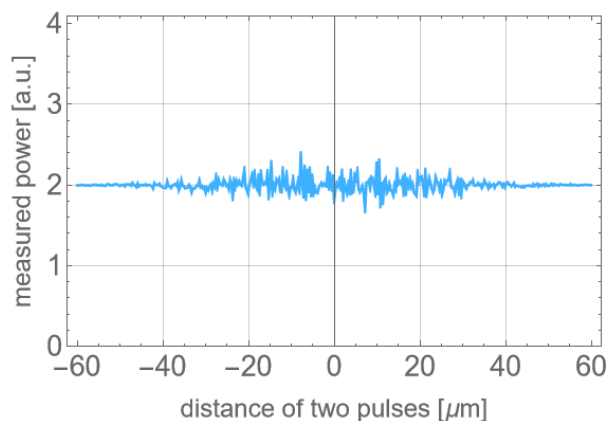


Figure 9: 128 other pulse correlations.

謝辞

本研究は、令和5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] 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).
- [2] 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).
- [3] Pardis Niknejadi *et.al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 040704 (2019).