

## MEASUREMENT OF MID-INFRARED FEL PULSES VIA FREQUENCY-RESOLVED OPTICAL GATING

Hokuto Iijima<sup>1,A)</sup>, Ryoji Nagai<sup>A)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>A)</sup>, Eisuke Minehara<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

We report measurements of chirped FEL pulse at Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The chirped FEL pulse is operated by the JAEA ERL-FEL superconducting accelerator at wavelengths between 20 and 22  $\mu\text{m}$ . The chirped pulse was previously measured by a second-harmonic-generation (SHG) autocorrelation, however the chirp rate was evaluated to assume the temporal shape. In order to measure the chirp rate of FEL pulse without any assumption, the frequency-resolved optical gating (FROG) is employed to completely retrieve a spectral phase or a temporal phase. We show a FROG measurement of a pulse distorted by atmospheric water vapour absorption. The SHG intensity calculated from the retrieval intensity and spectral intensity of FEL pulse were in good agreement with the SHG autocorrelation and the power spectrum.

### 周波数分解光ゲート法による中赤外FELパルスの計測

#### 1. はじめに

我々は超伝導加速管を用いたエネルギー回収型の加速器(ERL)を用いて高出力FELの開発研究を行ってきた<sup>[1,2]</sup>。これまでのFELパルス測定から(中心波長 $\sim 20\mu\text{m}$ )、そのパルスがチャープしていることが分かっていた<sup>[3]</sup>。しかし、過去に行なったSecond Harmonic Generation (SHG) 自己相関やスペクトル計測では、FELパルスの形状を仮定してチャープを評価するしかなかった<sup>[4]</sup>。

チャープした中赤外光は、例えば、多原子分子の解離などに応用できるが<sup>[5,6]</sup>、そのためにはチャープレートをよくおさえておく必要がある。そこで周波数分解光ゲート法(Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)<sup>[7]</sup>を用いて、ERL-FEL光パルスのチャープレートを測定することとし、その計測装置を構築した。本実験では、過去の計測実績から<sup>[8]</sup>倍波発生を利用した、SHG-FROGを行なった。

#### 2. FROGによるパルス計測装置

FROGの原理は参考文献<sup>[7]</sup>が詳しい。測定装置の基本は自己相関を測るautocorrelator部とSHGの波長(周波数)分布を測るspectrometer部からなる。図1は今回構築したSHG-FROGの測定系の概念図である。実験室側で集光されたFELパルスは最初、厚さ $13\mu\text{m}$ のポリエチレンフィルムによるビームスプリッター(BS)で2つの光に分けられる。それぞれの光はレトロリフレクター(RR)で反射した後、放物面鏡(PM)に

入射する。リフレクターの片方はステッピングモーターで駆動する自動ステージの上に設置されており、FROGに必要な光学遅延(OD)はこれで行なった。放物面鏡に入射する2つの光は、それぞれのリフレクターへの入射位置を調整することで、20mmの間隔を持たせている。放物面鏡は焦点距離150mmの金コートミラーで、倍波結晶(Te,  $t=2\text{mm}$ )をこの焦点位置においている。

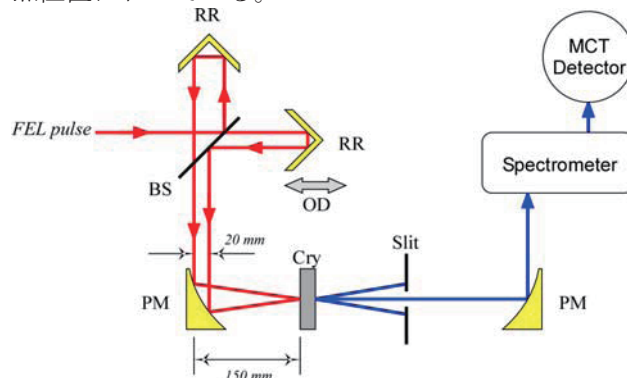


図1: Frequency-Resolved Optical Gating (FROG) 計測装置の概念。BS;ビームスプリッター、RR;レトロリフレクター、PM;放物面鏡、Cry;倍波結晶。

SHGを効率よく発生させるにはFELの偏向とTe結晶の方位をあわせる必要がある。結晶位置でのFELの偏向は事前に測定をし<sup>[9]</sup>、大まかに結晶方位をあ

<sup>1</sup> E-mail: Iijima.hokuto@jaea.go.jp

わせた後、実際のSHGの出力を観測しながらマイクロメータによって角度の微調整を行なった。

この後、回折格子型の分光器で、発生したSHGの波長分布を液体窒素冷却型のMercury Cadmium Telluride (HgCdTe, MCT)を用いて測定した。MCTからの信号は増幅した後、オシロスコープに入力している。

JEAE-ERLの加速器室と、FROGのための実験室は約24mの光学輸送系で結ばれている<sup>[10]</sup>。この光学輸送系は大気中の水分が光を吸収することを避けるために、加速器室側および実験室側の集光系を含め、真空チャンバー内に収めている。本実験では装置調整のため、FROG計測装置は大気開放の状態で行なった。輸送系を真空にしたことで、その輸送効率は70~80%に改善された<sup>[9]</sup>。ただし、あまりに強いFELは倍波結晶にダメージを与えるため、本計測ではFELのパワーを200mW程度に抑えて行なっている。

### 3. 測定結果

以下に今回の装置で測定したFELパルスの結果の一例を示す。図4(左)は測定されたFROGの画像である。この測定では電子ビームのマクロパルスの幅を130 $\mu$ sとし、90~130 $\mu$ sの間にゲートをかけて測定した。マクロパルスの繰返しは10Hzで、FROG画像の1測定点は4パルスの積算をかけている。取得された画像は補間を行い、再構築を行なうために162 $\times$ 162に分割している。1枚の画像取得時間は、分割数によるが、20~50分程度で図2及び図3の再構築の結果は取得時間内の平均的なパルスを表している。

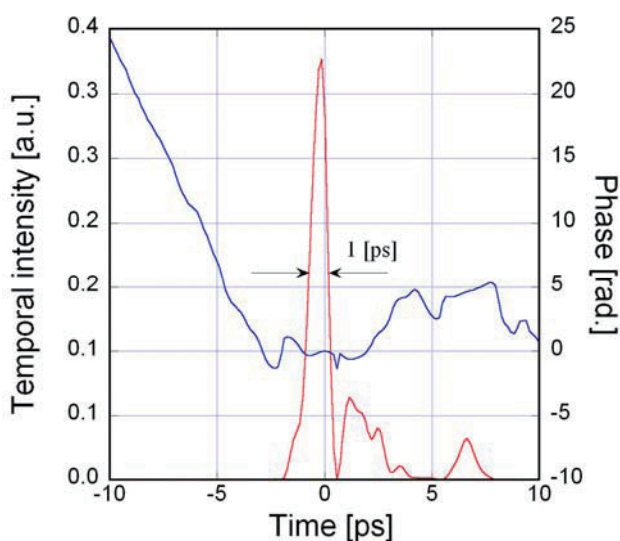


図2：再構築されたFELパルスの時間波形(赤)と位相(青)。

図2は再構築されたFELパルスの時間領域表示、

図3は周波数領域表示である。なお、FROGにSHGを用いた場合、SHG自己相関が遅延時間に対して対称になることに起因して、再構築されるパルスも原理的に時間の前後が決定できないが、ここではシミュレーションの結果等から便宜的に図2のような時間方向に決定した。これらの結果から見て取れるように、時間領域におけるFELパルスの半値幅は1psで、このほか行なった計測に置いても1~2psであった。これは装置評価のための行なった非共軸SHG自己相関の結果から予想されるパルス幅とよく一致した。また、メインパルスの後にいくつかのサブパルスが存在しているのが分かる。

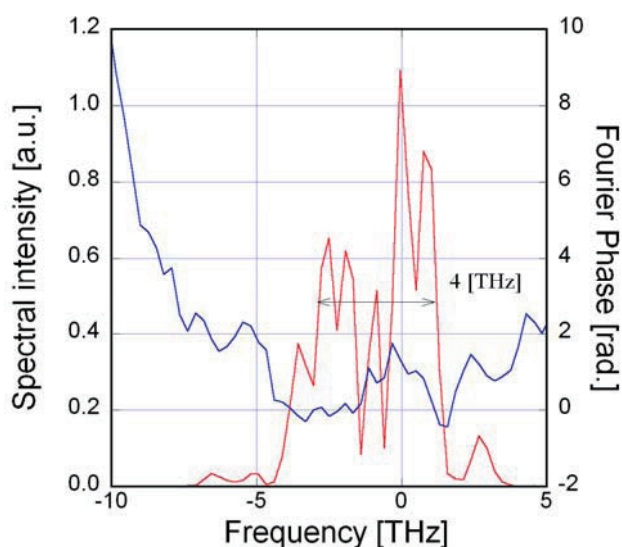


図3：再構築されたFELパルスの周波数波形(赤)とその位相(青)。

周波数領域においては、その半値幅は4THzであった。今回光輸送系は真空にしたものの、スペクトルにはまだ、水の吸収が見られる。このため、吸収の位置における位相の変化が大きく、結果位相がばらついている。また、再構築されたスペクトルは、単純なスペクトル計測の結果と水の吸収を含めて一致した。

FROGにおける再構築の妥当性は、SHG自己相関やスペクトル計測の結果と比較する以外に、測定されたFROG画像と再構築されたパルス波形から再び計算される画像(図4(右))との比較でも行なっている<sup>[6]</sup>。これは次式を用いて評価している。

$$G = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N |I_{i,j} - \alpha I_{i,j}^{(k)}|^2}$$

上式でNは画像の分割数、 $I_{i,j}$ は測定された各点( $\omega_i, \tau_j$ )での強度、 $I_{i,j}^{(k)}$ は再構築された強度で $\alpha$ は規格化定数である。図4に示した測定では $G=0.2\%$ であった。

#### 4. 再構築されたパルスに対する考察

一般にスペクトルが「櫛」のような形状を持っている場合、時間領域においてサブパルスが現れてくることが知られている。この場合、サブパルスは時間の正負両側に現れる。一方、パルスが3次の分散（2次のチャープ）、つまり周波数領域における位相が周波数に対して3次関数に従う変化をした場合、時間領域においてはメインパルスを中心に時間の片側にのみサブパルスが現れる。

本測定では、図3の結果を見るかぎり、水の吸収が観測されており、また、周波数に対する位相の変化も明確に3次関数にしたがっているとはいえない。しかし、時間領域においては時間の片側にしかサブパルスは現れておらず、この点からはパルスが2次のチャープを持っている可能性がある。いずれにせよ、明確にパルスのチャーププレートの評価するためには、さらに水の吸収に対する改善を行なう必要がある。この点に関しては現在、光輸送系の改良とFROG計測系そのものを真空内に入れることを検討している。

#### 5. まとめと今後

JAEA-ERLでは超伝導加速器を利用して、チャープしたFELを発振させている。このパルスのチャー

プレートを定量的に測定するためにFROGによるパルス計測装置の構築を行なった。今回、測定されたパルスは自己相関やスペクトル測定の結果と一致しており、計測系としては完成したといえる。

今後、輸送系における真空度の改善とともに、加速器のパラメータとパルス波形の相関を測定していく。

なお本研究は一部、科学研究費補助金（若手(B)）18740265の援助を受けている。

#### 参考文献

- [1] N. Nishimori, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A, 475 (2001) 266
- [2] R. Hajima, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A, 507 (2003) 115
- [3] R. Hajima and R. Nagai, Phys. Rev. Lett., 91 (2003) 024801
- [4] R. Hagai, et al., Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, 264(2002).
- [5] S. Chelkowski, et al., Phys. Rev. Lett., 65 (1990) 2355.
- [6] 藤村勇一, O plus E, No. 176, p. 102.
- [7] R. Trebino, et al., Rev. Sci. Instrum., 68(1997)3277.
- [8] R. Nagai, et al., Proc of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, 240(2001)
- [9] H. Iijima, et al., Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 738(2006).
- [10] H. Iijima, et al., Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 793(2005)

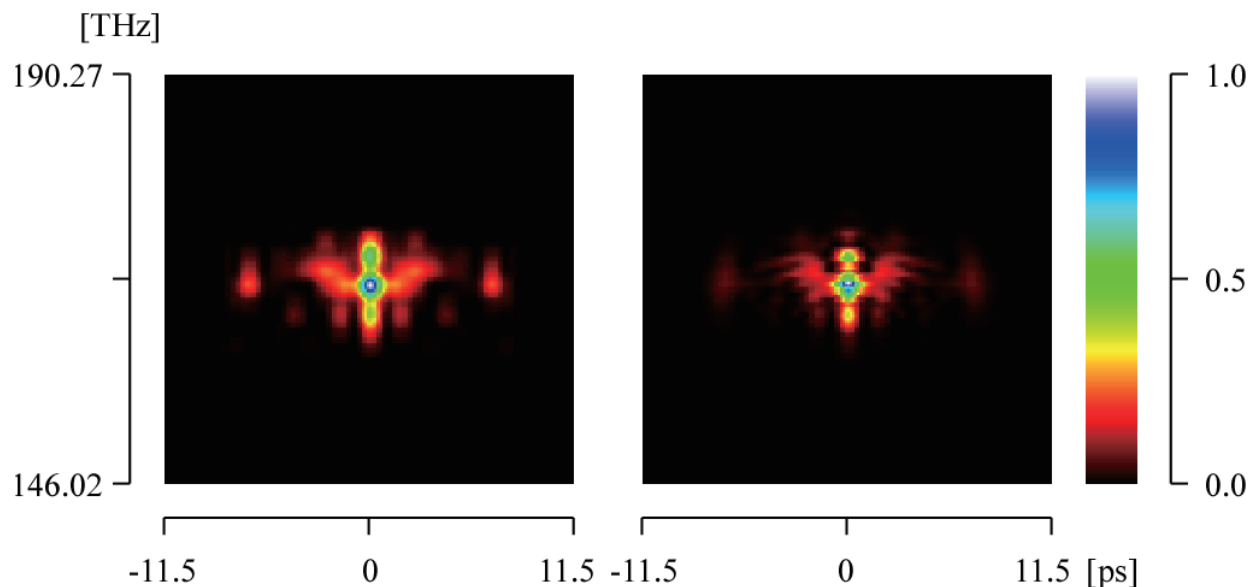


図4：再構築に用いたFROG画像（左）と再構築したパルスから計算されるFROG画像(左)。横軸は光学遅延時間、縦軸は角周波数。