

## 産研 THz-FEL における EO 計測の周波数解析

### FREQUENCY ANALYSIS OF EO MEASUREMENT FOR SANKEN FEL

川瀬啓悟<sup>#, A)</sup>, 誉田義英<sup>B)</sup>, 磯山悟朗<sup>B)</sup>  
Keigo Kawase<sup>#, A)</sup>, Yoshihide Honda<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> QST

<sup>B)</sup> The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

#### Abstract

We are conducting the electro-optic (EO) sampling measurements using a Ti:sapphire laser synchronizing to the accelerator in order to understand the time structure of the terahertz free electron laser (THz-FEL) at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. Up to now, the EO signal varies in shot-to-shot, but there is a periodic variation in a macropulse. To make clear the physical reason of this phenomena, we are studying the frequency analyses for the EO signals in various conditions of the FEL operation. We report the present situation of this study.

#### 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所(産研)の量子ビーム科学研究施設では、L バンド電子ライナックスシステムを用いて、発振型自由電子レーザー(FEL)により高強度のテラヘルツパルスを発生させている[1 - 4]。ライナックスシステムは 100 kV の熱電子銃、3 台のサブハーモニックバンチャー、1.3 GHz の 2 台の進行波バンチャーと 3 m 進行波加速管から構成されている[5, 6]。発振型 FEL に利用する場合は、大電力 RF パルスの長さを 8  $\mu$ s で動作させ、繰り返し 5 Hz で運転している。電子ビームは電子銃より 27 MHz の繰り返しで 8  $\mu$ s の間、発生させる。このようにして電子ビームは 27 MHz の繰り返しのパルス(マイクロパルス)の列が 8  $\mu$ s にわたって 5 Hz で繰り返される[7]。以下ではこの 8  $\mu$ s のマイクロパルス列をひとつのマクロパルスと表現し、特に断りのない限り、マイクロパルスのことを単にパルスと呼称する。ひとつのマクロパルス中におよそ 200 個のマイクロパルスが含まれていることになる。

電子ビームのパルス長は 30 ps 程度で、現在のところ、波長 70  $\mu$ m の光パルスのエネルギーは 200  $\mu$ J を超える FEL 出力を得ている。光パルスのピーク強度を詳細に決定するためには、パルスの時間プロファイルの計測が必要であるが、産研 FEL の場合、その波長領域が 60 - 120  $\mu$ m 程度であり、この領域での自己相関計測は適当な非線形結晶の入手が難しい。そこでこれまでに、電気光学(EO)効果を用いた相互相関計測[8, 9]を採用し、光パルスの時間構造計測を実施してきた[10]。本報告では、計測手法の概要と、これまでの計測結果で見られている信号の系統的な変動に対する解析についての現状を記す。

#### 2. 実験

EO 相互相関計測によるテラヘルツパルスの時間構造の計測では、プローブとして加速器 RF と同期したチタンサファイアレーザー発振器を利用し、EO 結晶として ZnTe を利用した。テラヘルツパルスの電場による EO 効果で、プローブパルスの偏光状態が変化するので、EO 結晶を透過するプローブパルスの偏光を分析することで、

テラヘルツパルスの電場に応じたプローブパルスの強度変化を得ることができる。プローブパルスの光路へ光学遅延を導入し、それをスキャンすることでテラヘルツパルスの強度プロファイルを得ることが期待できる。

チタンサファイアレーザー発振器(Tsunami, Spectra-Physics, Inc.)は 81.3 MHz の繰り返しで加速器 RF と同期しており、出力は 1 W 程度でパルス長 100 fs 程度である[11, 12]。Figure 1 に示す通り、プローブ光は自動ステージを用いた光学遅延を通して、ペリクルビームスプリッターにより FEL 光と同軸にする。FEL 光は真空窓を出た後、減光と偏光方向を固定するための 2 枚のワイヤグリッド偏光子を通してペリクルを透過する。その後、FEL とプローブとは軸外し放物面鏡で ZnTe に集光され、EO 効果を受けたプローブ光は偏光ビームスプリッタキューブで分析されて、GaAs フォトダイオード検出器(ET-4000, Electro-Optics Technology, Inc.)を用いて波形計測される。

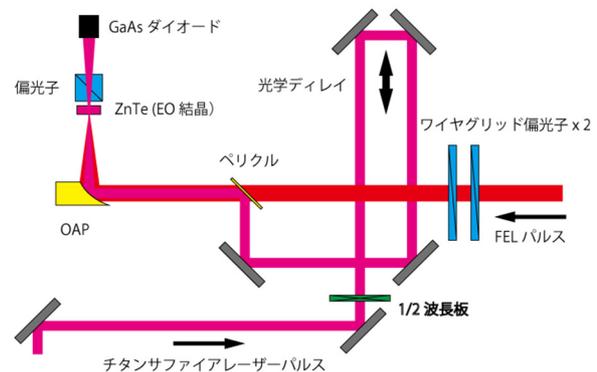


Figure 1: Schematic layout of the EO cross-correlation measurement for THz FEL.

#### 3. 計測結果と考察

テラヘルツ FEL の EO 計測結果はすでに以前の年会で報告している通り[10]、FEL の動作の特徴のひとつであるデチューニングの変化に対応した FEL パルスの時間的変化をとらえることができているが(Fig. 2)、その強度

<sup>#</sup> kawase.keigo@qst.go.jp

評価については未解決の問題があり、パルスの時間構造評価には至っていない。

強度変化の較正と比較すると、90 度以上偏光が回転していることが示唆される(Fig. 3)。

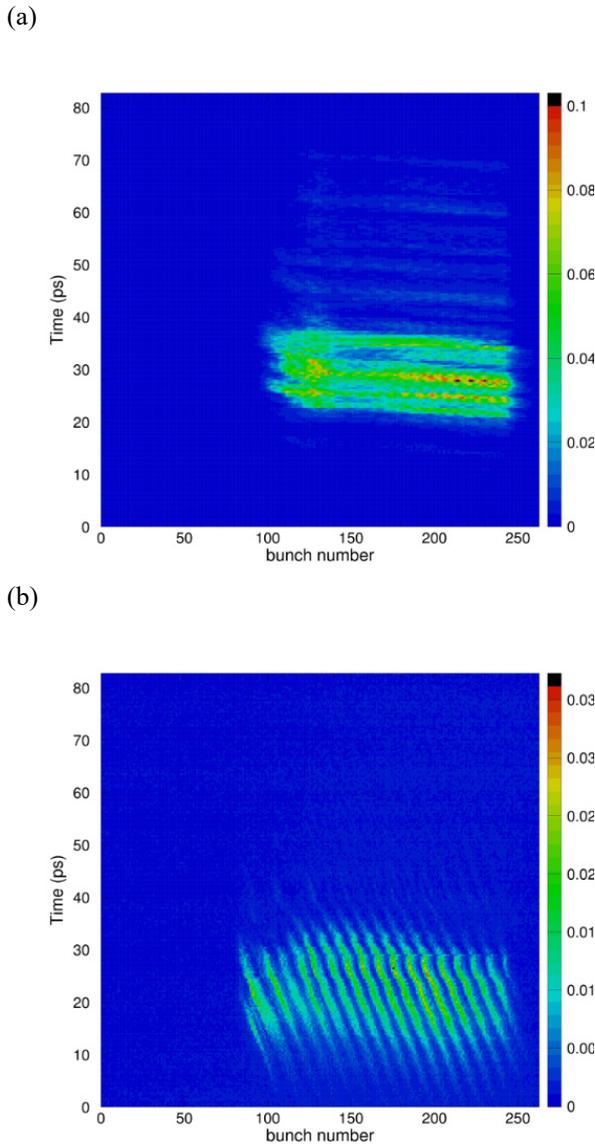


Figure 2: Results of EO cross-correlation measurement. Horizontal axis corresponds to the bunch number of the electron beam. Vertical axis corresponds to the micropulse duration for each bunch scanning the optical delay of the probe pulse. Each data is averaged of 10 waveforms. (a) near zero-detuning, (b) with some detuning. The slope of traces is good agreement with the roundtrip delay corresponding to the cavity-detuning.

その問題とは、ショットごとの変動が大きく、その変動の振る舞いが電場強度に依存した EO 効果による偏光分析光の強度変化の基本的な関係と整合しないことである。電場強度  $E_{\text{THz}}$  に対する EO 信号の強度変化は  $\sin^2(E_{\text{THz}})$  の依存性を持つはずである[9]。一般的な EO 計測と比べて本研究では電場強度が大きく線形近似は適用できないが、 $\sin^2(E_{\text{THz}})$  の依存性には従うはずである。実際、波長板によるレーザー偏光の回転角と分析光

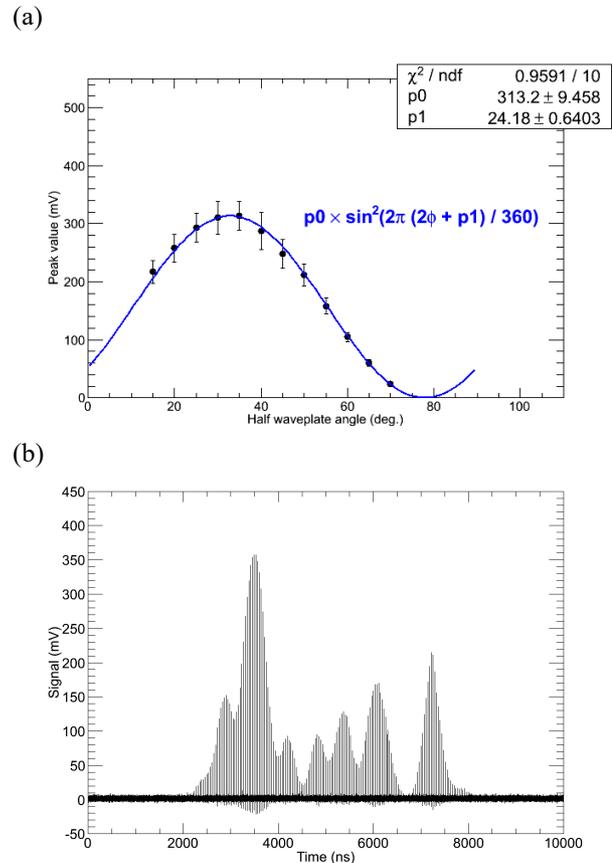


Figure 3: Comparison of (a) the variation of the analyzed power of laser rotating the polarization direction with a half wavelength plate and (b) the typical result of an EO signal. Maximum intensity of the EO signal is nearly equal to that of 90 degrees rotation of the polarization direction.

さてこの場合、電場強度が全くランダムに変化、すなわち、テラヘルツ電場の位相がプローブ光のタイミングに対してランダムに変化すると、ゼロと信号の最大値で頻度が最大となるはずであるが、測定ではある値を中心とした正規分布であったり、あるいは最小値が最大頻度となる指数関数的な分布であったりしている。位相のランダム性は、FEL の発生メカニズムがショットノイズで立ち上がることから、そのキャリア位相はランダムと考えることができるからである。例として Fig. 4 にある固定した光学遅延の時に連続して 100 回信号を測定し、それを 2 次元的に並べたものを示し、その時のある電子バンチのタイミングの光の EO 信号強度の度数分布も示す。なお、この時のテラヘルツパルスやプローブパルスの強度変動は EO 信号の強度変動と比べて小さいものである。一方、レーザーパルス長が 100 fs 程度であるのに対して、光電場周期が波長 100  $\mu\text{m}$  で 333 fs, 70  $\mu\text{m}$  で 233 fs であるから、レーザーパルスはテラヘルツの半波長から 1/3 波長でオーバーラップしている。この点については、今後詳細に検討する。

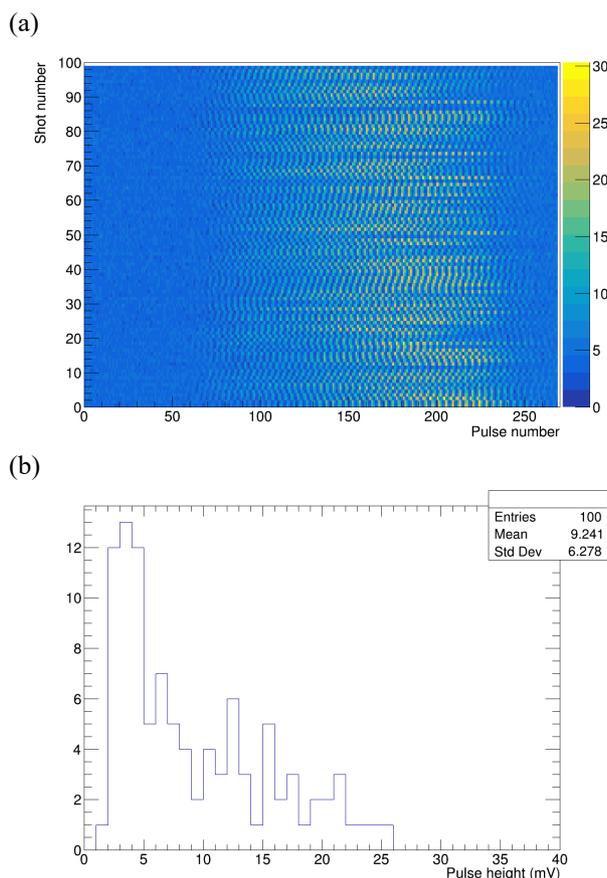


Figure 4: (a) trend of the EO signals at fixed delay time. (b) histogram of the pulse height of the signal for the pulse number 200 in (a).

以上のように計測結果の強度変化について明確な解答はまだ得られていないが、Fig. 5 に示すように、単一の計測波形、すなわち、ひとつのマクロパルスに対する EO 計測波形において、周期的な信号強度の変化が現れていることは、注目すべきことである。そこで、この周期的変化を周波数解析すると特徴的な周波数応答があることが現れてきた。マクロパルス内のテラヘルツパルスは共振器内を往復することにより強度がコヒーレントに発展しているものであるから、1 つのマクロパルス内の各テラヘルツパルス間の位相関係には決まった関係があると考えられる。その位相関係は共振器長に依存することも容易に類推できる。

実際、共振器長を変えた時のマクロパルス内の周波数応答は、Fig. 6 に示す通り、線形に変化することがわかった。しかしながら予想に反し、共振器長に対する周波数応答はテラヘルツパルスの光周波数に依存しないという計測結果を得た。テラヘルツ由来の信号を見ているにも関わらず、その変化が波長に依存せず共振器長に依存するという事は、波長に全く関係なく共振器長のみに関係する量、あるいは、波長で規格化される量を表現していると考えられるが、残念ながら現在のところ、まだこの特徴的な計測結果に対する明確な理解を得ていない。

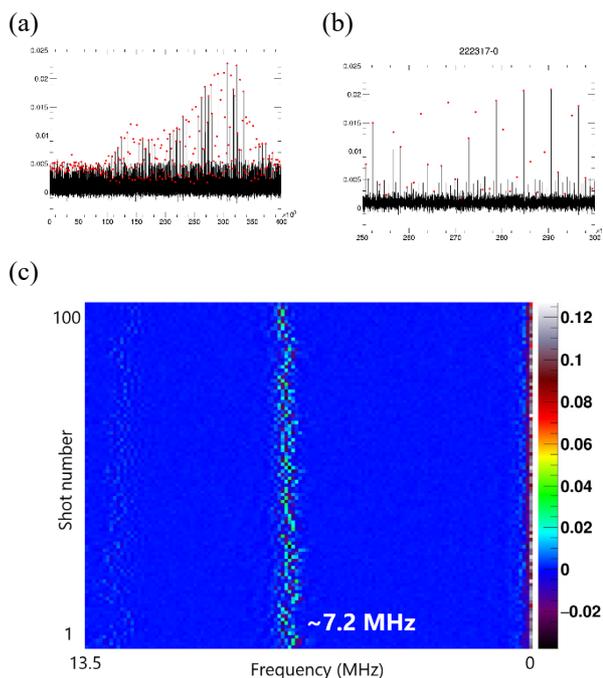


Figure 5: (a) EO signal for a macropulse. (b) zoom up of (a). It seems to have some periodicity. (c) Fourier transformation of the EO signal for sequential 100 shots.

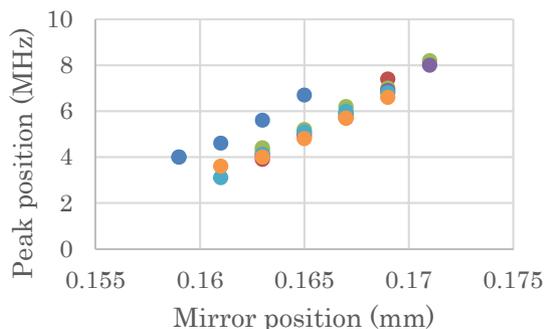


Figure 6: Dependence of the peak position of the Fourier transformation of the EO signal on the cavity detuning. The color means the difference of the wavelength of THz radiation from 70 μm to 110 μm. In spite of the wavelength difference, the peak position is same for the same cavity detuning. The shift of blue circles may be due to the thermal expansion or shrink of whole building.

#### 4. まとめ

EO 計測によるテラヘルツ領域の FEL パルスの時間構造計測において、その信号変動の原因を追究している。その中で、マクロパルス内において周期的な信号強度の変化があり、それを周波数解析することで、特徴的な振る舞いをしてることがわかった。残念ながらまだこの応答の物理的原因の理解には至っていないが、これら計測結果の特徴についての原因追及は大変興味深く、FEL の動作の理解を深める一端となることを期待している。

## 謝辞

関係する多くの人々に感謝致します。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業(課題番号 15K13407, 2310069)より助成を受けています。

## 参考文献

- [1] G. Ioyama *et al.*, *Infrared Phys. Tech.* 51 (2008) 371 – 374.
- [2] R. Kato *et al.*, “High Power Terahertz FEL at ISIR, Osaka University”, *Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, 2010*, pp. 2209 – 2211.
- [3] K. Kawase *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. In Phys. Res. A* 726 (2013) 96 – 103.
- [4] K. Kawase *et al.*, “High power Operation of the THz FEL at ISIR, Osaka University”, *Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, 2014*, pp. 528 – 531.
- [5] S.R. Farrell *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26* (1979) 4283 – 4285.
- [6] R. Kato *et al.*, “Re-commissioning of the Far-infrared Free Electron Laser for Stable and High Power Operation after Renewal of the L-band Linac at ISIR, Osaka University”, *Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, 2007*, pp. 521 – 524.
- [7] S. Suemine *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A* 773 (2015) 97 – 103.
- [8] C. Winnewisser *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 3069 – 3071.
- [9] 谷正彦、山本晃司、「電気光学結晶を用いたテラヘルツパルス波検出技術」、月刊オプトロニクス vol. 30, No. 356 (2011).
- [10] K. Kawase *et al.*, “Time Structure Measurement for the THz-FEL by Using an Electro-Optic Samplign Technique”, *Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, 2015*, pp. 174 – 176.
- [11] A. Saeki *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A* 546 (2006) 627 – 633.
- [12] S. Kashiwagi *et al.*, “Development of a Precise Timing System for the ISIR L-band Linac at Osaka University”, *Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, 2007*, pp. 413 – 416.