

## 電気光学サンプリングによる THz-FEL のマイクロパルス時間構造測定

### TIME STRUCTURE MEASUREMENT FOR THE THz-FEL BY USING AN ELECTRO-OPTIC SAMPLING TECHNIQUE

川瀬啓悟<sup>#,A)</sup>, 加藤龍好<sup>A),B)</sup>, 入澤明典<sup>A)</sup>, 藤本将輝<sup>A)</sup>, 古川和弥<sup>A)</sup>, 久保久美子<sup>A)</sup>, 磯山悟朗<sup>A)</sup>  
Keigo Kawase<sup>#,A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A),B)</sup>, Akinori Irizawa<sup>A)</sup>, Akinori Irizawa<sup>A)</sup>, Kazuya Furukawa<sup>A)</sup>, Kumiko Kubo<sup>A)</sup>,  
Goro Isoyama<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Intense THz radiation has been recently developed with the THz-free electron laser at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. To estimate the peak intensity of THz radiation, we are conducting to develop the methods to estimate the pulse duration of the THz pulse at the picosecond range. One of the promising methods to measure the pulse duration in THz region is electro-optic (EO) cross-correlation measurement. For the trial experiment, we made the EO cross correlation by using a femtosecond Ti:Sapphire laser oscillator, and ZnTe and GaP crystal. As the result, we found the time evolution of the THz-FEL for several detuning conditions. We shows the preliminary results of the EO cross correlation measurement for the THz-FEL with the wavelength of about 100  $\mu\text{m}$  and 85  $\mu\text{m}$ .

#### 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所では附属の量子ビーム科学研究施設に設置されている L バンド電子ライナックを用いて、テラヘルツ領域の発振型自由電子レーザー (THz-FEL) の発生の基礎研究とそれを用いた応用研究を実施している。近年ではライナックへの電子ビームの入射方法を改良し調整を進めることで、高い強度の THz パルスビームを生成できるようになった。これにより、いくつかの THz 領域の物質科学研究グループへ THz-FEL を供給する利用研究の段階に至っている<sup>[1,2]</sup>。

FEL に限らず従来のパルスレーザーを評価・利用する上で最も重要な基本的パラメータのひとつは、レーザーパルスの時間幅である。そのため、我々のグループはこれまでにマイケルソン干渉計を用いた 1 次の自己相関測定により、FEL パルスの時間幅および時間構造の評価研究を実施してきた<sup>[3-5]</sup>。これらの研究により、おおよその FEL のパルス幅と動作点の変化、すなわち FEL 光共振器長のデチューニングに対するパルス構造の変化や、マイクロパルス内における時間発展などの示唆を得た。

そこで本研究では、FEL ミクロパルスの時間構造を評価するために、電気光学 (EO) サンプリングを用いたクロスコリレーション測定を実施した。本測定では 81 MHz のモード同期チタンサファイアレーザー発振器を利用し、EO 結晶としては ZnTe と GaP を用いた。本発表では、本測定で得られた THz-FEL のマイクロパルス時間構造の測定結果を示し、FEL の詳細な時間特性と各 EO 結晶の応答特性を議論する。

#### 2. EO 効果による THz 検出

近年、超短パルスレーザーの研究が進み、それによって駆動される THz 領域の短パルスの発生研究も進んでいる。生成された THz パルスの時間構造を測定するために、EO 効果を用いた手法が利用されている<sup>[6,7]</sup>。EO 効果による THz パルス検出の概念を Figure 1 に示す。THz パルスを EO 結晶に入射することで、THz パルスの電場に従って EO 効果により結晶の屈折率が変化する。そこで THz パルスの時間的に一部分重なる超短パルスプローブ光を入射すると、結晶の屈折率変化によりその偏光状態が変化する。これを偏光子で分析することで重なった部分の THz パルスの電場強度に依存したプローブパルス強度が得られる。THz パルスとプローブパルスのタイミングを変えることで THz パルスの時間構造を取得することができる。

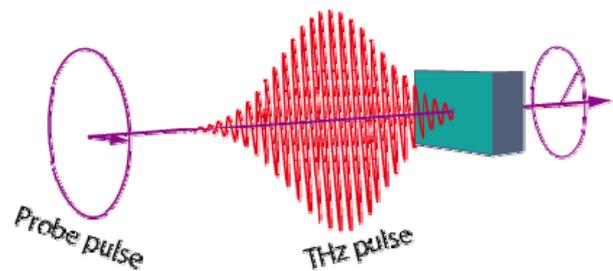


Figure 1: Schematic diagram of the THz detection by EO effect.

これまでに FEL パルスの時間構造評価への応用として、オランダ FELIX において実施され、その結果が報告されている<sup>[8]</sup>。しかしながら、この報告では 1 GHz の繰り返しで連なるマイクロパルス列で構成さ

<sup>#</sup> kawase@sanken.osaka-u.ac.jp

れるマクロパルス全体の時間構造、すなわち射影構造のみと電場測定の一例を示している。そこで本研究では、各 FEL ミクロパルスに対する EO 測定を実施することで、より詳細に FEL の時間構造とその時間発展を評価する研究を実施した。

### 3. 実験

産研 L バンドライナック電子ビームで駆動される THz-FEL の時間構造を評価するために、加速器 RF 信号から生成されたクロックと同期したパルス幅 100 fs 程度のモード同期チタンサファイアレーザー発振器(Tsunami, Spectra-Physics)を用いて、EO クロスコリレーションの測定を実施した。実験セットアップの概要とその写真を Figure 2 に示す。THz-FEL パルスは軸外し法物面鏡(OAP)で EO 結晶中に集光される。また必要に応じて THz 光はワイヤグリッド偏光子ペアや減光フィルターを用いて強度を変化させる。プローブ光であるチタンサファイアレーザーパルスは 1/2 波長板で最適な偏光方向に設定された後、パルスモータ制御直動ステージから構成される光学ディレイを通して、ペリクルビームスプリッターにより THz 光と共軸で EO 結晶へ入射される。

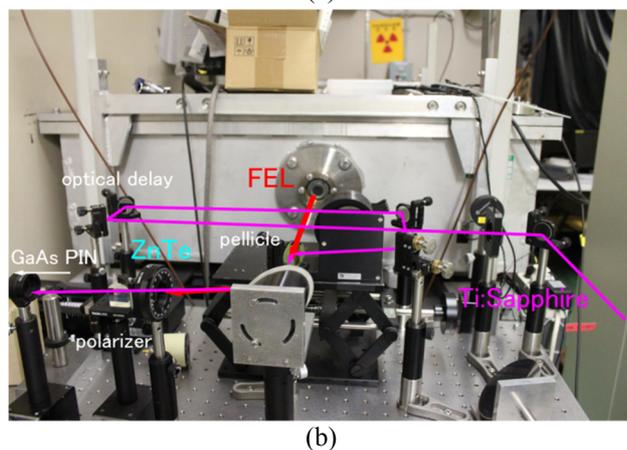
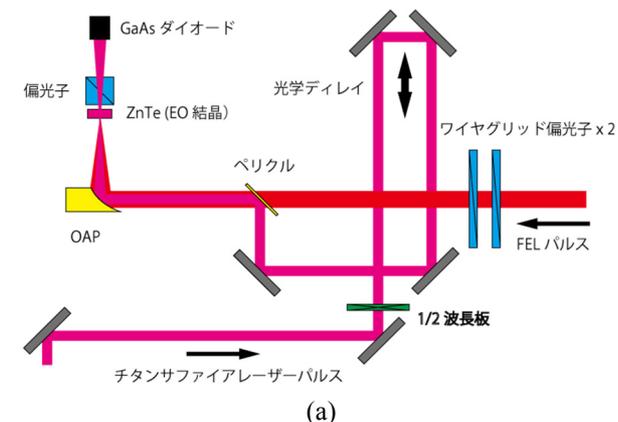


Figure 2: Schematic diagram of the experimental setup (a) and a photograph of the setup (b).

THz パルスによる EO 効果により偏光状態の変化したプローブパルスは偏光子を通して分析され、高速応答の GaAs ダイオード検出器(ET-4000, Electro-Optics Technology, Inc.)で検出され、オシロスコープにより波形が読み出される。プローブパルス光学系の光学ディレイを動かすことで、THz パルスとの EO 結晶中での時間的な重なりをスキャンし、THz パルスの時間構造を導出する。本研究では波長 100 μm 付近の THz パルスについては厚さ 500 μm の ZnTe を用い、いくつかのデチューニングに対して EO クロスコリレーション測定を実施した。また、波長 85 μm 付近については同じ ZnTe と厚さ 300 μm の GaP との比較試験を実施した。

### 4. 結果

波長 100 μm 付近の THz-FEL パルスに対する EO クロスコリレーションの予備的な測定結果の例を Figure 3 に示す。デチューニング位置の違いにより、クロスコリレーション図が顕著に異なることが明確である。共振器を光が往復する時間と電子ビームの繰り返し間隔が一致する共振器長を完全同期長と呼び、それ付近で最も高い強度の FEL が発生する。共振器長が完全同期長よりも短く THz-FEL パルスが共振器を往復する時間が電子ビームの繰り返し間隔、すなわちプローブパルスの繰り返し間隔よりも短い場合、THz ミクロパルスはマクロパルス列の時間が進むに従って、RF クロックに同期したプローブパルスよりも時間的に前に存在することになる。実際 Figure 3 (a)は完全同期長に近い(b)と比較して、明確にミクロパルスが時間的に進んでいることがわかる。この傾きは完全同期長からの共振器長の差とおおよそ一致している。その結果、ここで得られたクロスコリレーション図は THz-FEL の時間発展の振る舞いをよく示している。

また Figure 3 (c), (d)はそれぞれ(a), (b)の結果をミクロパルスの時間軸へ射影したマクロパルスの射影時間形状である。デチューニング長が短い場合と比べて完全同期長に近い場合の方が時間幅が短くなるという結果はこれまでの自己相関による評価結果<sup>3-5)</sup>やオランダ FELIX の先行研究<sup>6)</sup>の報告と一致している。

さらに本研究では ZnTe だけではなく GaP についての EO クロスコリレーション測定を試験した。これは ZnTe と比べて GaP はより高周波数帯域で EO サンプリング指数が大きくなるということが報告されているからである<sup>9)</sup>。試験的に波長 85 μm 付近で測定したが、この領域では顕著な差が見られず、結晶の厚さの違いによる差のみであったと思われる。今後、より詳細に比較する必要があるとともに、物性の比較も詳細に検討することが必要である。

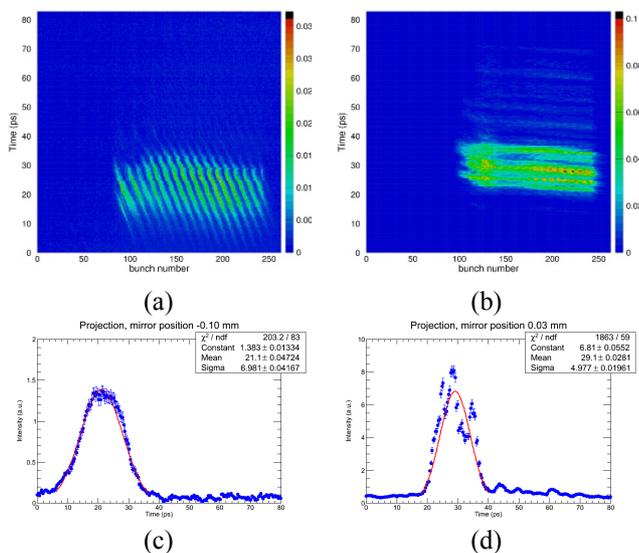


Figure 3: (Preliminary results) EO cross-correlation diagrams of the THz-FEL with the wavelength of about 100  $\mu\text{m}$  (a, b). The horizontal axis corresponds to the bunch number in the macropulse but its origin does not mean the first bunch. The vertical axis corresponds to the time of micropulses. (c, d) show their projection onto the micropulse duration axis. (a, c) detuning of about 140  $\mu\text{m}$ . The slope of each trace in the diagram corresponds to the detuning length of the resonator. (b, d) detuning is near zero-detuning (desynchronization).

## 5. まとめ

本研究により、パルス幅 100 fs のチタンサファイアレーザー発振器と ZnTe あるいは GaP を用いて、EO クロスコリレーション計測を実施することにより、THz-FEL の時間構造を詳細に測定できることを提示した。これまでの実験から、本測定手法により FEL のデチューニングに従った FEL の時間構造の顕著な変化と時間発展とが、明確に視覚化できることがわかった。

今後、EO クロスコリレーションの信号強度の THz 電場強度に対する依存性を詳細に検討することで、高強度 THz-FEL パルスの時間幅およびピークパワーの絶対値を正確に評価できる手法を確立する。また、様々な EO 結晶の適用波長の最適範囲を検証することで、広範囲にわたる THz-FEL の時間構造とその発展を系統的に研究する。

## 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 (No. 24310069, 15K13407)からの助成を受けております。

現在産研 L バンドライナックのモジュレータ用高

圧電源が故障しており、KEK のご厚意により電源を借用しております。ここに関係者の皆様に謝辞を申し上げます。

本研究で使用した GaP 結晶は大阪大学基礎工学研究科永井博士よりお借りしております。

## 参考文献

- [1] 川瀬啓悟他, “27 MHz 電子ビームによる THz-FEL 発生試験”, 第 10 回日本加速器学会年会プロシーディングス p. 154, 名古屋, 8 月 3-5 日, 2013.
- [2] K. Kawase et al., “High Power Operation of the THz FEL at ISIR, Osaka University”, Proc. of FEL2014, p. 528, Basel, Switzerland, Aug. 25-29, 2014.
- [3] 古橋健一郎他, “干渉分光計を用いたテラヘルツ波 FEL のコヒーレンス長測定”, 第 6 回日本加速器学会年会プロシーディングス p. 468, 東海, 8 月 5-7 日, 2009.
- [4] 大角寛樹他, “自己相関法を用いた FEL ミクロパルスの計測”, 第 10 回日本加速器学会年会プロシーディングス p. 163, 名古屋, 8 月 3-5 日, 2013.
- [5] 矢口雅貴他, “干渉計を用いたテラヘルツ FEL の特性測定”, 第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス p. 41, 青森, 8 月 9-11 日, 2014.
- [6] C. Winnewisser et al., Appl. Phys. Lett. 70, 3069 (1997).
- [7] 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 8 号特集, 2011.
- [8] G.M.H. Knippels et al., Phys. Rev. Lett. 83, 1578 (1999).
- [9] Q. Wu and X.-C. Zhang, Appl. Phys. Lett. 70, 1784 (1997).