

干渉計を用いたテラヘルツ FEL の特性測定 CHARACTERISTICS MEASUREMENT OF THE THz-FEL WITH AN INTERFEROMETER

矢口雅貴^{#, A)}, 川瀬啓悟^{A)}, 加藤龍好^{A)}, 入澤明典^{A)},
藤本将輝^{A)}, 船越壮亮^{A)}, 堤亮太^{A)}, 宮崎数磨^{A)}, 磯山悟朗^{A)}
Masaki Yaguchi^{#, A)}, Keigo Kawase^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Akinori Irizawa^{A)},
Masaki Fujimoto^{A)}, Sousuke Funakoshi^{A)}, Ryota Tsutsumi^{A)}, Kazuma Miyazaki^{A)}, Gorou Isoyama^{A)}
^{A)} ISIR, Osaka University

Abstract

Time-resolved interferograms of the THz free electron laser (FEL) at Osaka University are measured using a Michelson interferometer and a fast THz detector. The FEL is operated in the high-power mode or the 27 MHz mode, in which a single FEL pulse lases in the optical cavity, under the conditions of an electron beam energy of 15 MeV, a wiggler gap of 30 mm, and a wavelength of 110 μm . An FEL macropulse generated in the present experiment consists of approximately 100 micropulses with durations of up to a few tens of picoseconds separated by 36.8 ns. The THz detector used in the experiment is a Schottky diode detector for quasi-optical radiation with a time resolution of shorter than 200 ps. The interferograms for all the micropulses are simultaneously measured using the detector and they show appreciably different patterns from an interferogram pattern measured using a time-integrated detector for the macropulse.

1. 序論

大阪大学産業科学研究所（阪大産研）では、L バンド電子ライナックを利用してテラヘルツ領域の自由電子レーザーの開発から応用まで様々な研究を行っている。これらの研究を更に高度化するため、発生した FEL の特性を知ることは重要である。FEL は波長連続可変の単色コヒーレント光を発生するが、波長分布や時間構造は FEL 動作状態に強く依存する。

FEL は、高エネルギー電子ビームがウィグラー中で発生する自発放射を種光として、共振器中を往復する光パルスの後続の電子バンチが増幅して発振に至る。FEL パルスが光共振器を往復毎にのエネルギーの一部が、順次、光共振器の上流側ミラー中央の穴から取り出されるが、それぞれのパルスをマイクロパルスと呼び、その並びをマクロパルスと呼ぶ。

阪大産研 FEL では、各マイクロパルスは電子バンチ (20~30ps) と同程度の時間幅をもつと考えられており、従来から使用している運転モード (108MHz モードと呼ぶ) では 9.2ns 間隔、最近開発した高出力の運転モード (27MHz モード) では 37ns 間隔で並んでいる。

FEL の特性を調べるため、波長スペクトルは、回折格子分光器を用いて計測する一方、相補的な情報である FEL ミクロパルスの時間構造はマイケルソン干渉計を用いて測定した干渉パターンから評価する。

マイケルソン干渉計を用いた測定では、移動鏡を動かすステッピングモーターを精度の高いものに換えたり、水蒸気による吸収の影響を抑えるために乾燥空気を導入するなど、より正確に FEL 特性を評価

するために測定系の改造が行われてきた。

その際、測定に用いられる検出器には、焦電素子など、マクロパルスのエネルギーを計測する検出器を用いて干渉パターンを得てきた。

マクロパルス中のマイクロパルス列は、それぞれが取り出された時の共振器中の FEL 光の情報を持つが、これまでの検出器では、マイクロパルスの時間平均に対応した情報しか得られない。

本論文では、応答速度の速いショットキーダイオード検出器を用いてマイクロパルスごとの干渉パターンを測定し、その時間発展や時間変化を調べる研究の結果を報告する

2. 実験方法

阪大産研 L バンド電子ライナックを用いたテラヘルツ自由電子レーザーの模式図を図 1 に示す。実験は、電子ビームのエネルギー15MeV、27MHz モードと呼ぶ高出力運転モードで、入射電子ビーム長 8 μs 、ウィグラーギャップ 30mm、FEL 波長 110 μm で行った。

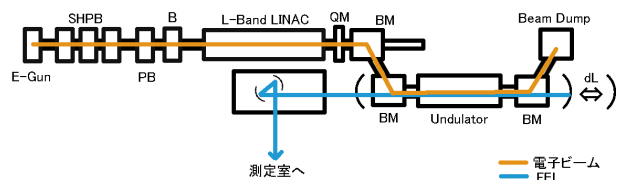


Figure 1: Schematic drawing of the THz-FEL system at Osaka University.

[#] yaguchi25@sanken.osaka-u.ac.jp

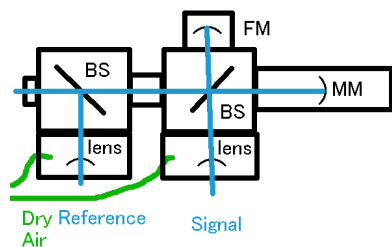


Figure 2: Schematic drawing of the measurement system using the Michelson interferometer

図2に示すマイケルソン干渉計では、参照光を取り出すためのビームスプリッターと、干渉のためにビームを分けるもためのものの2枚があるが、いずれも厚さ6mmのマイラーを用いた。

この波長領域では空気中の水蒸気による吸収が大きく、干渉パターンに細かなピークが多数現れて干渉波形に大きな影響を与える。この影響を除去するため、干渉計から取り出した光は乾燥空気中で満たした容器の中で非球面レンズを用いて集光し、検出器で測定する

時間分解能が信号処理に用いるオシロスコブの帯域4GHz帯域より高速なショットキーダイオードと、比較のため従来から使用する時間応答が数百μs程度の焦電素子の2種類の検出器で測定した。ショットキーダイオード検出器の場合には高周波ノイズを除去するため5回平均をとる。

3. 実験結果

図3に光共振器の移動鏡の軸方向位置の関数として焦電素子を用いて測定したマクロパルスのエネルギーを示す。これはディチューニングカーブと呼ばれ、FEL動作点の変化を示す。

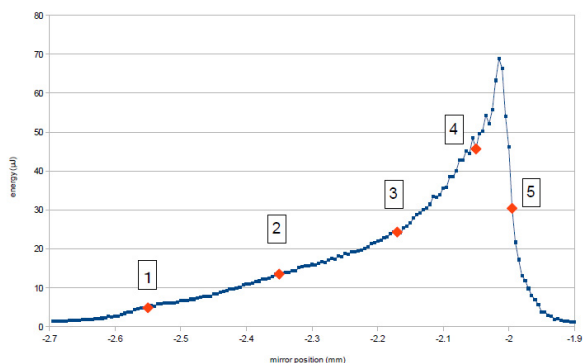


Figure 3: Detuning curve of the macropulse energy measured with an energy meter. The horizontal axis shows the relative position of a mirror for the optical cavity (mm) and the vertical axis is the macropulse energy (μJ).

図3に示すディチューニングカーブ上の1から5までの動作点で測定した干渉波形を図4に示す。左

側の図は焦電素子で測定した干渉波形、右側はショットキーダイオードで測定したものである。

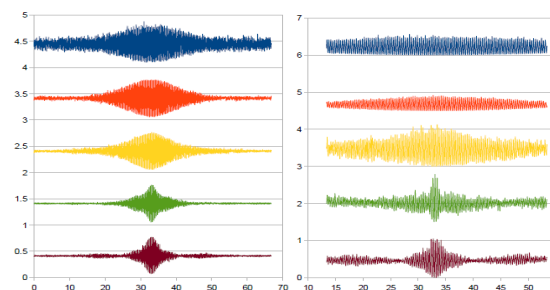


Figure 4: Interferograms of the FEL pulse measured at the positions from 1 to 5 in the detuning curve in Fig. 3. Left; with the energy meter, right; with the diode detector.

焦電素子についてはマクロパルスのエネルギーを測定して得た干渉パターンで、ショットキーダイオード検出器の場合、移動鏡の各位置での参照光の平均値から最も信号強度の強いマイクロパルスを選び、そのマイクロパルスのみを抜き出して得た干渉パターンである。また、FEL光パルス毎の変動や時間変化の影響を低減するために、干渉光強度は参照光強度で規格化した。

マイクロパルスのエネルギーはマクロパルスのそれに比べて2桁小さいためS/N比は悪いが、どちらも、ディチューニングカーブのピークに近づくにつれて干渉波形の幅が狭くなり、過去の実験結果と一致する。

しかし、マクロパルスの干渉波形とマイクロパルスのそれとは明らかな差があることが分かる。

ディチューニング位置が図3に示すマクロパルスエネルギーが最大の位置4でショットキーダイオード検出器を用いて参照光を計測した。図5にこれを5回平均して得たマクロパルスの時間波形を示す。

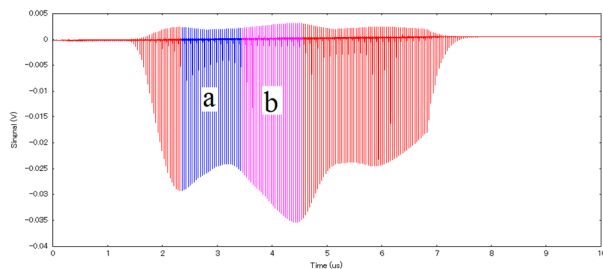


Figure 5: FEL macropulse measured with a diode detector.

ここで、3つのピークがみられるが、最初のピークに達するまでの干渉パターンを図6に、電子ビームが通過して光との相互作用が無い減衰過程での干渉パターンを図7に示す。

図6ではマクロパルスで最初のピークに近づくにつれて、即ちFELパルスのパワーが成長するに従い、干渉パターンの幅が狭くなり、図7では、干渉波形に変化はなく、パワーの減衰と無関係であることが分かる。

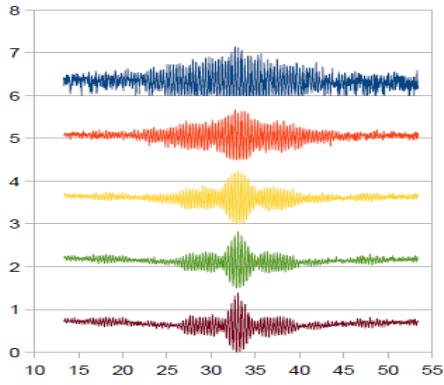


Figure 6: Interferograms of a micropulse measured in the leading edge of the macropulse shown in Fig. 5.

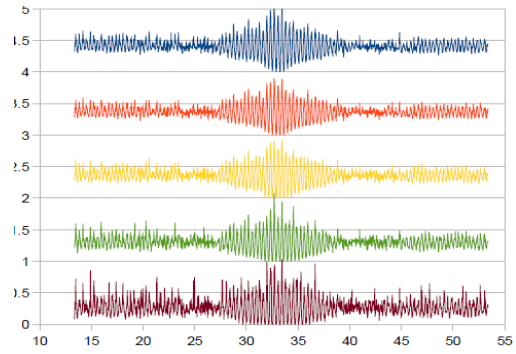


Figure 7: Interferograms of a micropulse measured in the trailing edge of the macropulse shown in Fig. 5.

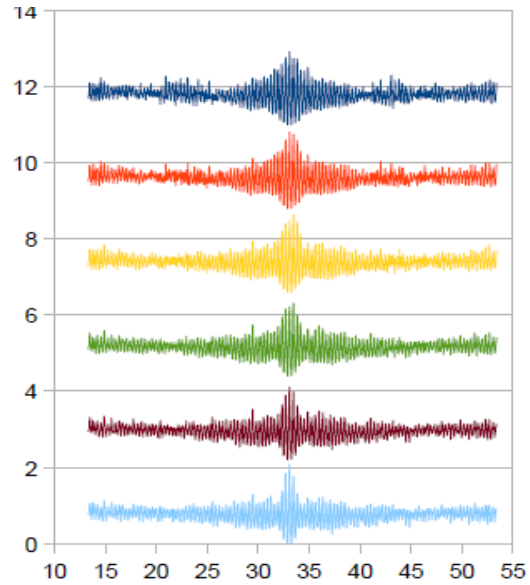
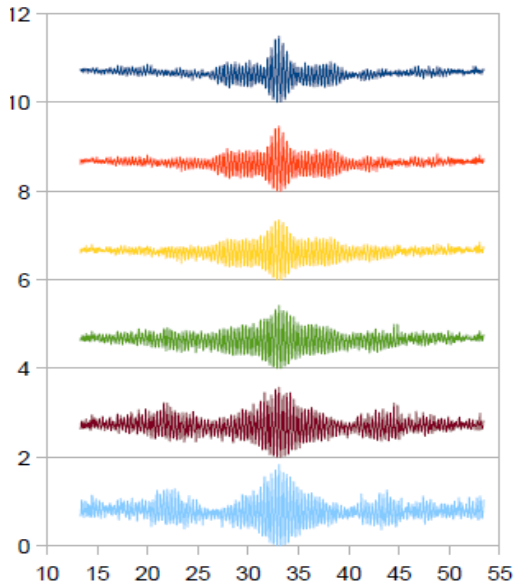


Figure 8: Interferograms of a micropulse measured in the region a (left) and the region b (right) of the macropulse shown in Fig. 5.

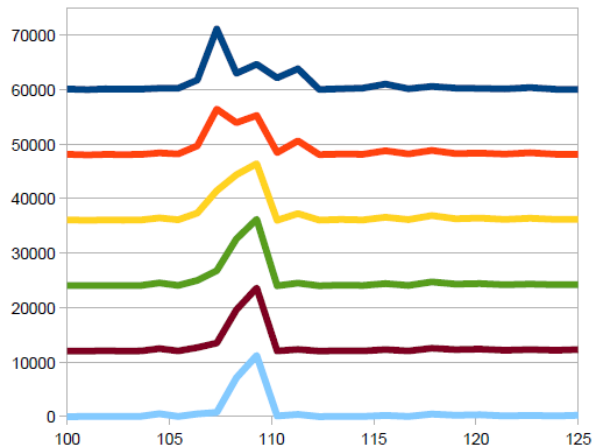
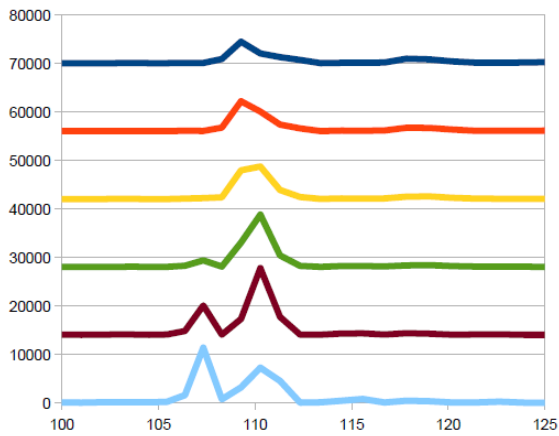


Figure 9: Wavelength spectra of an FEL micropulse derived using FFT for the region a (left) and the region b (right) of the macropulse shown in Fig. 5.

図 5 で最初のピークが減衰する領域 a と次のピークに向けて再び増大する領域 b について測定した干渉パターンを図 8 に、それをフーリエ変換して得られる波長スペクトルを図 9 に示す。

どちらも、マクロパルスのピークに近いほどマイクロパルスの干渉パターンの幅が狭まる。領域 a と b でマイクロパルスのエネルギーが低下するに従い、干渉パターンのサイドピークがメインのピークから離れ、波長スペクトルでは 2 つ以上のピークが見える。特に、領域 a では、2 つのピークの強度が入れ替わる様子がみえる。

4. まとめと今後

焦電素子より時間応答の早いショットキーダイオード検出器を用いて、マイクロパルスごとに干渉パターンを得ることに成功した。これによって、FEL の時間発展をマイケルソン干渉計で測定し研究できる。今後、得られたデータの解析を進め、FEL の特性を詳しく調べる計画である。

また、今回の実験では、測定に時間がかかること、データ量が増大したこと、S/N 比が悪いことなどの問題点が分かった。ショットキーダイオード検出器を用いて干渉波形を測定する場合、オシロスコープで 5 回測定して平均したデータをパソコンに転送して記録する作業を、5 μ m ステップで 6mm の区間移動鏡を動かして繰り返し計測するため、干渉波形を 1 回取得するのに 30~40 分程度の時間がかかる。同じ条件で、焦電素子で計測する場合は、9 分以下で測定でき、データ量も 1/10 以下である。今後、干渉パターンの分解能を上げるためステップ間隔を小さくしたり、移動区間を広げたりすればこの問題が更に大きくなる。従って、実験を効率化する工夫が必要だと分かった。