

超短パルスレーザーを利用した THz-FEL の特性評価と高度化

CHARACTERIZATION AND DEVELOPMENT OF THZ-FEL BY USING FEMTOSECOND LASER

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

Abstract

We are developing the intense THz FEL by using an L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. In order to evaluate characteristics of the generated THz FEL in time-domain, we are conducting the pulse duration measurements with the cross correlation between the THz FEL and the Ti:Sapphire laser pulses. Also we make a trial experiment to extract a single THz FEL pulse by applying the laser-activating semiconductor switch to respond to the request for the single THz pulse irradiation experiments. In this presentation, we report the present status of these studies.

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所ではLバンド電子ライナックを用いてテラヘルツ(THz)領域の高強度な自由電子レーザー(FEL)を発生させている[1]。FELはその発生メカニズムから、電子ビームと共振器中の光パルスとの重なり具合により、光の強度と時間幅が決定される。この重なり具合は、光共振器間隔を変化させることで変えることができる。また FEL 発生に必要なアンジュレータの間隔を変えることで磁場強度を変えることにより、発生 FEL の波長や強度も変化する。このような光パルスの時間情報を引き出すためには、相関計測を実施することが有効である。これまでのところ、マイケルソン干渉計を用いた自己相関測定を実施してきたが、ここでは別の方法としてチタンサファイアレーザーを用いたクロスコリレーションによる時間情報の引き出しを試みる。

また現在、発生させた THz FEL を利用する上で、高強度単一パルスへの要求がある。発振型 FEL では、連続した電子パルスにより駆動されるため、光パルス列として発生する。産研の場合、運転条件にもよるが、100 パルス程度の飽和した FEL パルスが 9.2 ns あるいは 37 ns 間隔で発生している。このような光パルス列を用いて、物質に対する非線形応答を研究する場合、光パルス列が連続照射されることによる熱的な影響が、ピーク強度の依存した光電場強度に対する非線形応答を隠してしまうことがある。そのために、高強度単一 THz パルスの切り出しが要求されている。これを実現するために、高強度レーザーパルス照射による半導体スイッチの試験を実施

している。

本発表では、THz FEL とチタンサファイアレーザーとを組み合わせた上記 2 つの研究についての現状を報告する。

2. テラヘルツ自由電子レーザーパルスとチタンサファイアレーザーパルスとのクロスコリレーション実験

高強度光パルスの時間幅は、最も重要な特性のひとつであり、ピーク強度などを評価するために必要な基本的物理量である。一般に超短レーザーパルスの時間的評価は高次高調波生成をもとにした自己相関法が適用されることが多い[2]。しかしながら、高次高調波研究が十分に実施されている近赤外領域と異なり、産研 FEL の発振領域は THz (遠赤外) 領域であり、高次高調波発生の研究が十分に進んでいるとは言えず、波長領域も広く、様々な非線形結晶に対する研究も必要である。そこで本研究では以前にオランダ FELIX において実績のある[3]、チタンサファイアレーザーで生成される超短パルスとのクロスコリレーション計測を試験した。

本研究では FELIX における手法と同様に[3]、ZnTe 結晶において THz パルスにより誘起される複屈折によりチタンサファイアレーザーの偏光の変化を検出する方法を採用している[4]。実験セットアップの概要を Figure 1 に示す。チタンサファイアレーザーは SpectraPhysics 社製 TSUNAMI システムを利用しており、繰り返し周波数は 81 MHz 付近で L バンドライナックの基準発振器と同期されている。

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

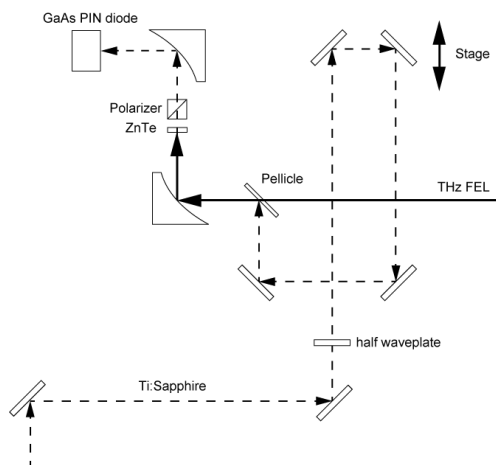


Figure 1: Schematic diagram of the setup for the cross correlation measurement of the THz FEL pulse with the Ti:Sapphire laser by using ZnTe crystal.

THz FEL を入射しない状態で、波長板を用いて ZnTe を透過したチタンサファイアレーザーパルスのポラライザ透過強度が最小となるように偏光を設定する。この状態で、THz FEL を入射し、チタンサファイアレーザーパルスの光学遅延をスキャンする。ZnTe 結晶中において THz FEL とチタンサファイアレーザーパルスとの時間的重なり具合で、ポラライザを透過する強度が変化する。チタンサファイアレーザーのパルス幅は 100 fs 程度である一方、THz FEL のパルス幅は 1 から 20 ps 程度であると考えられるので、チタンサファイアレーザーパルスの光学遅延をスキャンしてポラライザ透過強度の変化を見ることが期待される。

しかしながら測定を実施した結果、ショットごとの変化が非常に大きく、高精度に THz FEL のパルス幅を測定することが困難であった (Figure 2)。現在、この変動の原因を調査検討中である。従って今後、この大きな変動の原因を究明することが本実験を遂行する上で不可欠な課題である。

3. レーザー駆動半導体スイッチによる単一テラヘルツ自由電子レーザーパルス切り出し

THz FEL の高強度化により、発生させた THz 高電場に対する物質の非線形応答を研究する利用が進められている。現在の産研 THz FEL では 100 パルス程度の飽和した THz パルスが連続して試料に照射されており、物質によってはこの連続したパルスの総熱量による物質の変化が、高電場に対する非線形応答の結果を隠してしまう可能性がある。そのためこのような場合には、高強度単一 THz パルスの利用が望まれている。

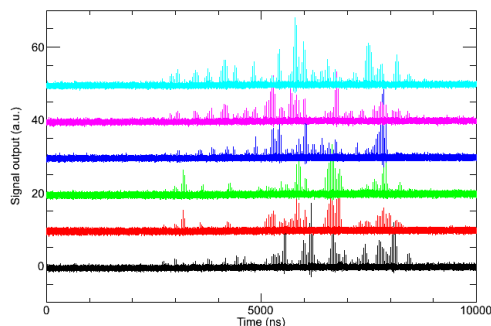


Figure 2: Waveforms of the Ti:Sapphire laser pulses through the polarizer by changing the polarizations with the birefringence of the ZnTe induced by the THz FEL pulses. 5 sequential waveforms are shown and they are significantly varying in shot to shot.

上の実験で利用したチタンサファイアレーザーシステムには再生増幅器も設置されており、より高い強度のレーザーパルスを利用することができる ([5] Figure 3)。多くの半導体は THz 光に対して透明である。その一方、高強度パルスを半導体に照射することにより、数 ns から数 μ s の間だけ THz 光に対してミラーとすることができる [6, 7]。この現象を用いて、単一 THz パルスを切り出す試験を実施した。

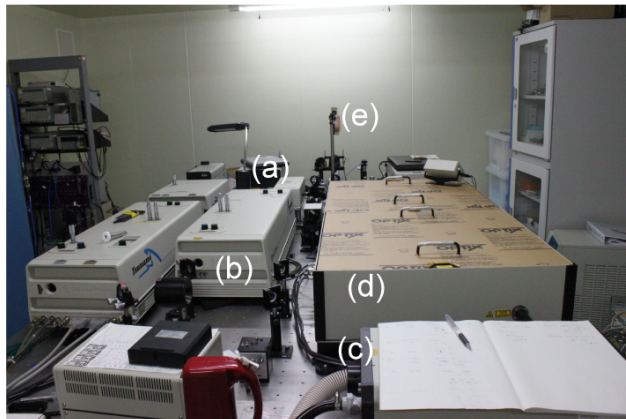


Figure 3: Ti:Sapphire laser system in this experiment. (a) 5 W, 532 nm cw solid-state laser (Spectra-Physics, Millennia V). (b) Mode-locked Ti:Sapphire laser oscillator (Spectra-Physics, TSUNAMI). (c) 10 W, Q-switching laser (Spectra-Physics, Evolution-X). (d) Regenerative amplifier (Spectra-Physics, SpitFire).

切り出しのための半導体には GaAs ウェハと Si ウェハを試験した。GaAs は直接遷移型半導体であり、高強度レーザーによってその表面を伝導帯へ励起した後、1 ns 程度でまた価電子帯に戻る [6]。そのため、単一 THz FEL パルスのみを切り出せることが期待される。一方、Si の場合は間接遷移型半導体であり、生成された伝導帯プラズマの再結合には 1 μ s

程度の時間を要する[7]。そのため、本研究の THz FEL に対しては数パルスが切り出されることが期待される。そこで、実際に Figure 4 に示したような実験セットアップのもとで、THz FEL の半導体ウェハによる切り出し試験実験を実施した。発生させた THz FEL は水平方向に偏光しており、チタンサファイアレーザーを入射していないタイミングで半導体ウェハに THz 光の透過を最大化するために、ブリュースター角で THz 光を入射する配置としている。

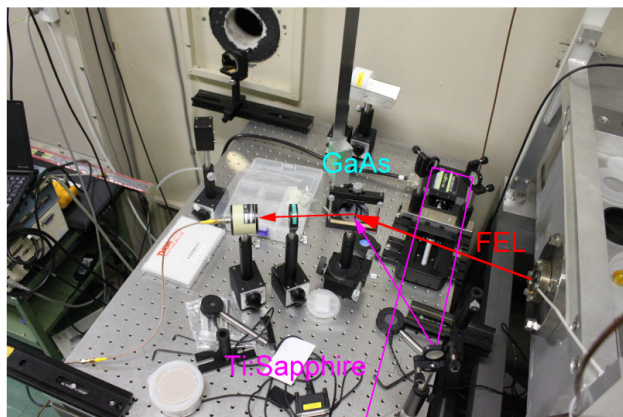


Figure 4: Experimental layout for the laser-activating switch.

GaAs と Si をチタンサファイアレーザーで励起して反射させた THz FEL パルスを高速焦電素子 (Molelectron P-5) で計測した結果を Figure 5 に示す。GaAs の場合、期待通り単一パルスの切り出しが確認されている一方、Si の場合、数パルスのみが高い減衰率で切り出されている。この予想との差異の原因については今後の検討課題である。

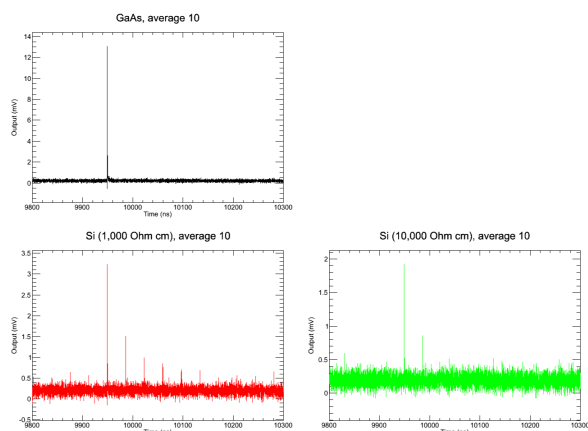


Figure 5: Waveforms of the reflected THz pulses with GaAs and Silicon (Resistivity 1,000 ohm-cm and 10,000ohm-cm) wafers. Each waveform is averaged with 10 shots.

さらに、チタンサファイアレーザーのパルスが 100 fs 程度であるため、伝導帯プラズマの生成過程が十分に速いと仮定すると、光学遅延をスキップ

することで THz パルスの時間幅を推定することができる。その結果を Figure 6 に示し、20 ps 程度の広がりであることが示唆され、この値は FEL を駆動している電子ビームパルスと同程度である。詳細な評価については今後の課題である。

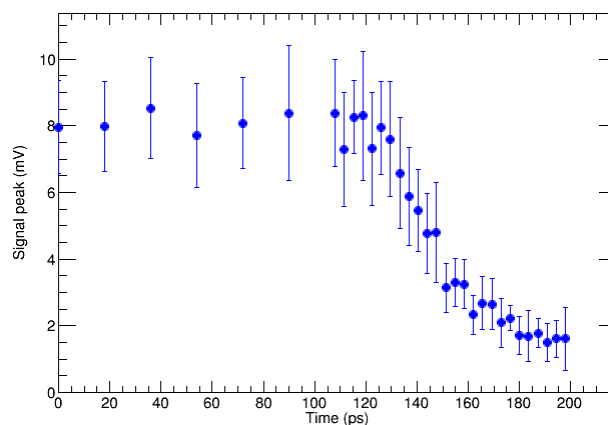


Figure 6: Intensity variation of the reflected pulses with GaAs wafer by changing the optical delay of the Ti:Sapphire laser pulse. It shows the slope with the time duration of about 20 ps.

4. まとめ

産研 THz FEL の特性評価と利用の多様化を目指して、チタンサファイアレーザーシステムとの組み合わせられた試験研究を開始した。クロスコリレーションによる THz FEL パルスの時間特性評価については、出力信号の変動が大きく、まずその原因を究明することが解決すべき課題である。そのため、THz パルスとチタンサファイアレーザーパルスとの同期精度およびジッターの精密な評価も実施する必要がある。

レーザー励起半導体反射スイッチについては、GaAs を用いることで単一 THz パルスを切り出すことが確認でき、THz パルスの時間幅評価につながる可能性を示唆できる。反射率の測定とレーザー強度依存性などの基本的特性評価を今後、早急を実施する予定である。

また今後、本研究で得られた単一 THz パルスの物質科学の利用研究へ供給していくことを検討している。

本研究の一部は JSPS 科研費 24310069、24651102 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Kawase et al., Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A 726 (2013), 96.
- [2] J.-C. Diels and W. Rudolph, "Ultrashort Laser Pulse Phenomena", 2nd Ed. (2006), Elsevier Inc.
- [3] G.M.H. Knippels et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999), 1578.

PASJ2014-SAP015

- [4] C. Winnewisser et al., Appl. Phys. Lett. 70 (1997), 3069.
- [5] A. Saeki et al., Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A 546 (2005), 627.
- [6] A.J. Alcock and P.B. Corkum, Can. J. Phys. 57 (1979), 1280.
- [7] F.A. Hegmann and M.S. Sherwin, Proc. SPIE 2842 (1996), doi:10.1117/12.262736.