

高品質ビームの発生及びその応用研究

研究代表者 鷲尾 方一
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

我々は非常に良く制御された高品質ビーム、ここでは電子ビーム・X線ビーム・レーザービーム等、を発生し、それを用いることによる応用研究を行っている。これらはエネルギーフロンティアである高エネルギー実験用加速器施設のベースとなる技術であるとともに、非常に高品質であるが故、様々な応用が可能である。これらのテーマの中から最近大きな成果のあがっているものに関して記載する。

本年度はこれまで開発してきたフェムト秒レーザーシステムとテラヘルツパルス発生を組み合わせることによって、テラヘルツパルスの時間領域分光に成功した。本稿ではレーザーに関する開発の現状及びテラヘルツパルスの計測結果に関して報告を記載する。

2. 主な研究成果

我々の研究プロジェクトでは喜久井町キャンパスに設置したレーザーフォトカソード高周波電子銃(RF-Gun)と呼ばれる高品質電子ビーム発生装置が基幹となっている。この装置ではレーザー光を光陰極に照射することによって電子ビームを取出し、即座に加速できることから世界トップレベルの高品質電子ビーム生成に成功している。これまでに高品質電子ビームの傾きを制御することによってコヒーレントテラヘルツ光の生成を実証した。また、電子生成及び他の利用を目的としてフェムト秒のレーザー光源の開発を並行して行ってきた。本年度は両者を組み合わせることによって、テラヘルツパルスの時間領域分光を行い、テラヘルツパルスの詳細評価に成功した。2.1節では時間領域分光に関する説明、プローブとして用いるレーザーシステムの現状及び、テラヘルツパルスおよび電子パルスとの同期に関する開発状況に関して報告する。時間領域分光においてレーザーパルスはテラヘルツパルスより十分に短い必要があるとともに、そのパルス幅以下の精度でテラヘルツパルスと同期していることが求められる。また、2.2節ではテラヘルツパルスの評価結果に関する内容を報告する。テラヘルツパルスのパルス強度をパワーメータで計測するとともに、時間領域分光を行うことでパルス幅が計測でき、非常に高いピーク強度のテラヘルツパルス生成を実証することに成功した。またスペクトルを計測することで広帯域なテラヘルツ光が生成されていることを確認した。

2.1 時間領域分光のためのプローブ用 Yb 添加ファイバレーザー開発

テラヘルツは 10^{12}Hz 付近の周波数の電磁波であり、ちょうど電波と光波の間に位置することで両者の特性を併せ持つ周波数である。テラヘルツの周波数は計測器等で直接観測することは困難であるが、極短パルスのレーザーはその波長よりも短いため、これをプローブとすることによって波形を直接観測することが可能である。また、その時間波形をフーリエ変換することによって周波数スペクトルを得ることも可能である。以下の Fig. 1 にその概念図を、Fig. 2 に時間波形を計測するための EO (Electro-Optic) サンプリグ法に関する原理図を示す。

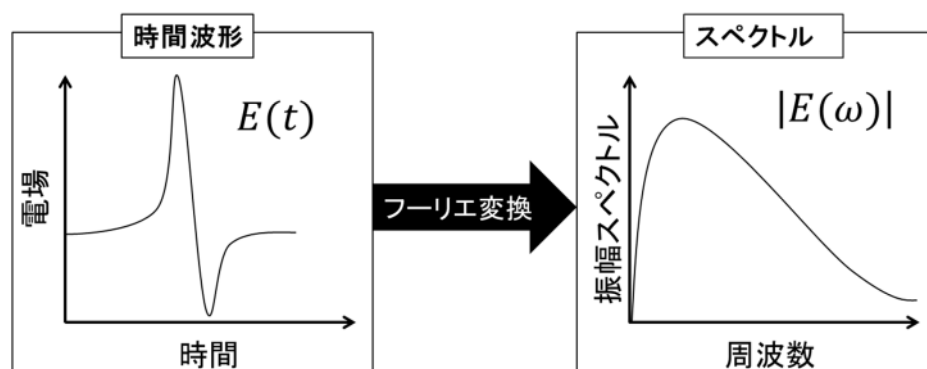


Fig. 1 : テラヘルツ時間領域分光概念図

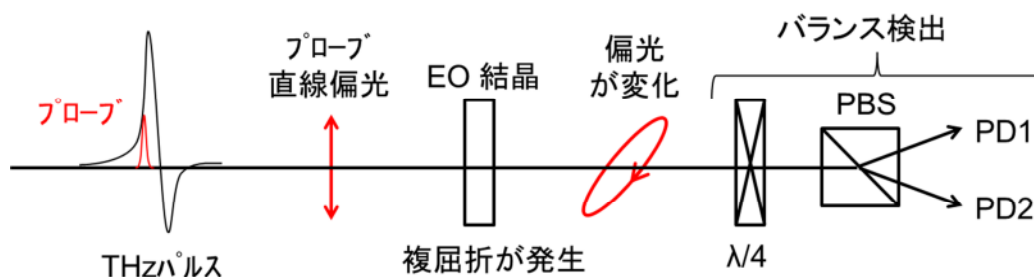


Fig. 2 : EO サンプリグ法によるテラヘルツ時間波形の計測法

Fig. 1 に示すようにテラヘルツ光の時間波形を計測できれば、そのフーリエ変換からスペクトル情報を得ることができる。これが時間領域分光の原理である。時間波形の計測にはフェムト秒のレーザーと EO 結晶を用いた EO サンプリグ法を用いた。Fig. 2 に示すように、直線偏光のプローブパルスとテラヘルツパルスを同時に EO 結晶に入射する。EO 結晶としては、今回 ZnTe を用いた。EO 結晶内では、テラヘルツ電場によってポッケルス効果が生じ、その電場強度に対応してレーザー光の偏光が変化する。つまり偏光が変化すると PBS (Polarized Beam Splitter) 後の 2 台の Photo Diode (PD) での強度バランスが崩れることになる。その変化量をテラヘルツパルスとプローブレザーの時間遅延を変化させて取得することでテラヘルツパルスの電場分布を計測することが可能である。

EO サンプリグに用いるプローブレザー光としては、いくつかの条件が課せられることになる。1. テラヘルツパルスよりも十分に短いこと 2. テラヘルツパルス(それを生成する電子ビーム)と十分良い精度で同期されていること 3. 偏光変化を計測できる程度の強度を有していること である。これらを満足するレーザーシステムを以下のように構築した。

レーザーシステムとしては、Fig. 3 に示すように Yb 添加ファイバレーザー及び増幅器を構築した後、パルス圧縮器によってパルス幅を圧縮する構成とした。パルス幅としては、Yb フ

アイバで十分帯域の広いモードロッキングを実現するとともに圧縮器によって達成する。電子ビームとの同期は発振器内に設置したピエゾ素子(圧電素子)とミラーによって共振器長を制御することによって実現した。また、計測に十分な強度を得るために 2 台の増幅器を含めている。

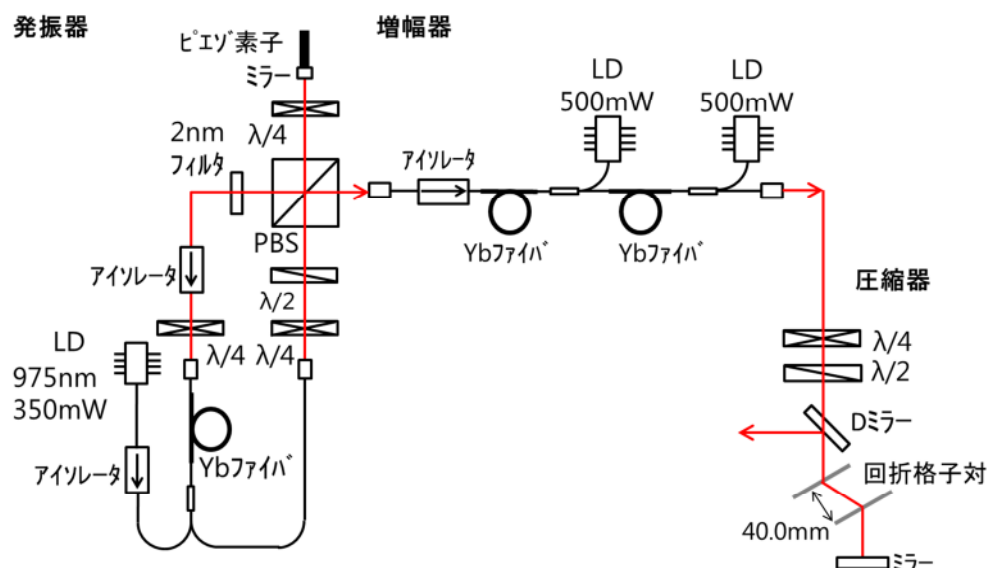


Fig. 3 : 構築したプローブレザーシステム

このように構築したレーザーシステムによって得られたレーザーの性能を以下の Table 1 にまとめた。

Table 1 : プローブレザーパラメータ

パラメータ	値
平均出力	167.3mW
繰返し周波数	119MHz
中心波長	1036.2nm
スペクトル幅(FWHM)	18.0nm
パルス幅(FWHM)	192fs
同期性能(rms)	0.2ps以下

十分に短い 200fs 以下のパルス幅を確保しつつ、圧縮した後に十分な平均出力を達成している。また、同期性能としても 0.2ps 以下とテラヘルツ波長に比べて十分に良い性能であることがわかる。このレーザーをプローブ光として、テラヘルツパルスの計測を行った。

2.2 電子線傾き制御によるコヒーレントテラヘルツパルスの計測

高品質電子線の応用研究として、我々は広帯域テラヘルツパルスの生成を以前から行ってきた。詳細は昨年度及び一昨年度の本報告を参照いただきたい。簡潔に説明すると、電子線の傾きをチェレンコフ光の放射角に揃えてターゲットに照射することによって広帯域かつ高強度のテラヘルツ光を得ることが可能である。これまでに本原理によって 10 倍程度の強度増

強が可能であったこと、これを用いたテラヘルツイメージング等を行ってきた。今回は実際に広帯域であることを時間領域分光法によって確認するとともに、パルス幅等の計測から詳細な評価を行ったので、報告する。

まずはテラヘルツパワーメーターを用いたパルスあたりのエネルギーの計測結果に関して以下の Table 2 に示す。

Table2 : テラヘルツパルスエネルギー計測結果

	Tilted	Un-tilted
Total	33.2 nJ	4.49 nJ
0.3THz	10.6 nJ	—
0.6THz	3.98 nJ	—

結果を見てわかる通り、パルスあたりのエネルギーとして 33.2nJ/pulse を得た。また、傾きを施さない場合と比較しても約 10 倍の増強に成功していることがわかる。『0.3THz』『0.6THz』としたのは、パワーメータの前に±10%の幅を持ったバンドパスフィルタを挿入した際の計測結果であり、どちらも十分な強度を計測していることから、広帯域な特性を持っていることが推察される。

以下の Fig. 4 には時間領域分光を行った際のセットアップ写真と模式図を示す。

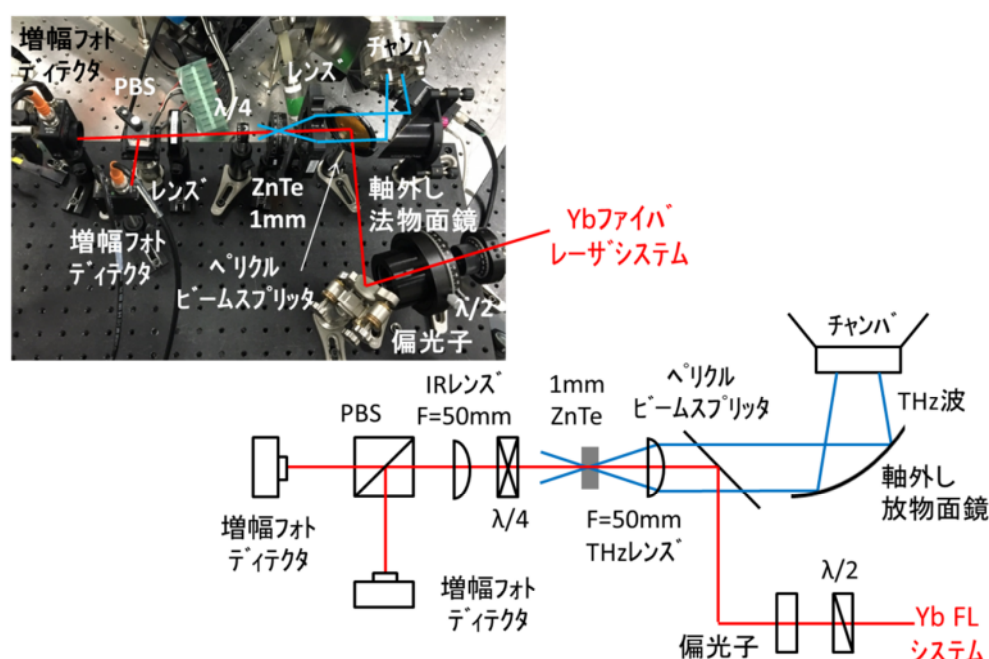


Fig. 4 : 時間領域分光システムの写真(左上)と原理図(右下)

真空中で生成されたテラヘルツパルスは水晶の真空窓を通して大気中に取り出される。取り出されたテラヘルツパルスは軸外し放物面鏡によって平行光になり、レンズを用いて ZnTe 結晶(EO 結晶)に集束される。一方、プローブ用レーザーはペリクルビームスプリッタ(テラヘルツは透過するが、レーザーは 60%程度反射する)を用いて同軸で ZnTe 結晶に入射し、1/4 波長板を通して PBS によって水平偏光と垂直偏光に分けられ、独立した PD によって検出される。プローブレザーの遅延は直動ステージを用いて調整できるようになっており、これ

によってテラヘルツパルスとの時間遅延を調整している。

以下の Fig. 5 には最終的な計測結果及びそのフーリエ変換であるスペクトル分布を示す。

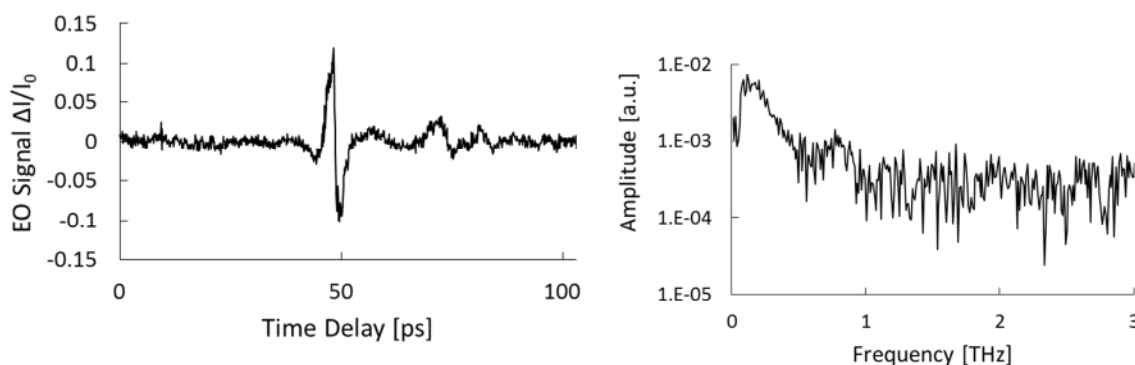


Fig. 5 : 時間領域分光の計測結果 時間波形(左図)と周波数分布(右図)

Fig. 5 を見てわかる通り、計測したテラヘルツパルスの時間波形はシングルサイクルを持っており、これにより非常に広帯域な周波数分布であることがわかる。パルス幅は 3.5ps(FWHM)程度であり、非常にパルス幅も短いことがわかる。前述のパルスエネルギーの計測結果と合わせて計算することによって、9.1kW の非常に高いピークパワーを持ったテラヘルツパルスが得られたことがわかる。また、周波数分布に関してみると、多少高周波側でノイズレベルと同等のためわかりにくい、0.1~1THz 以上の広帯域なパルスが得られていることがわかる。また、現在の ZnTe 結晶を用いた場合にはシステム自体の応答が 1THz 程度に制限されることがわかっており、より広帯域なパルスであることが見込まれる。今後よりテラヘルツパルスの強度を増強するとともに、周波数分布計測に関しても改良して行く予定である。

3. 共同研究者

遠藤 彰 (理工学研究所・客員教授) 坂上 和之 (高等研究所・助教)

4. 研究業績

4.1 学術論文

“Development of optical resonant cavities for laser-Compton scattering” T. Takahashi, T. Akagi, S. Araki, Y. Honda, T. Omori, A. Kosuge, H. Shimizu, N. Terunuma, J. Urakawa, R. Tanaka, Y. Uesugi, H. Yoshitama, Y. Hosaka, K. Sakaue, M. Washio, Nucl. Instrum. Meth., In press.

“Feedback-free optical cavity with self-resonating mechanism”, Y. Uesugi, Y. Hosaka, Y. Honda, A. Kosuge, K. Sakaue, T. Omori, T. Takahashi, J. Urakawa, and M. Washio, APL PHOTONICS, 1, 026103 (2016), doi: 10.1063/1.4945353

“Contribution of material's surface layer on charge state distribution in laser ablation plasma”, Masafumi Kumaki, Dannie Steski, Shunsuke Ikeda, Takeshi Kanesue, Masahiro Okamura, and Masakazu Washio, Review of Scientific Instruments, 87, 2, 02A921

1-3(2016), doi: 10.1063/1.4939781

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

“Laser-Compton scattering X-ray source development using optical enhancement cavity”
OSA International Workshop on Compact EUV and X-ray Sources, Hiroshima, Japan, Oct
2016, Kazuyuki Sakaue

4.4 受賞・表彰

小柴裕也 「レーザーコンプトン散乱におけるルミノシティ増大のためのクラブ衝突」
第 13 回日本加速器学会年会賞
中里佑介 「RF-Deflector を用いた RF-Gun における電子ビームの傾き角計測」
第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会 若手優秀講演賞

4.5 学会および社会的活動

日本放射線化学会 副会長
日本放射線研究連合 (JARR) 副会長
日本アイソトープ協会 理工学部会委員
ラドテック研究会 幹事
日本加速器学会 評議員
RadTech Asia Organization, Vice-president

5. 研究活動の課題と展望

本年度は高品質電子ビームから生成したテラヘルツパルスの詳細性能評価を行った。シングルサイクルパルスであることを確認し、広帯域特性も実証することができた。また、ピーク強度として、10kW 近い強度を確認したことで、非常にインパクトの大きな成果を示すことができた。現状の課題としては、時間領域分光システムの周波数応答特性が 1THz 程度で上限となっている点である。これは EO 結晶内におけるレーザー波長とテラヘルツ波長における屈折率差によって決定される。より広帯域な計測を行うためには、1. EO 結晶として薄い媒質を用いる 2. 異なる EO 結晶を用いる 3. プローブ光のレーザー波長を変える の 3 手法が考えられる。1 に関しては、薄い結晶を用いると信号強度も下がるため、テラヘルツパルスの強度の向上が必須である。2 に関しては EO 結晶として、GaP を用いることで達成することが可能である。ただしこちらも ZnTe 結晶に対して信号強度が低下する。3 として、775nm のレーザー光を用いることで、信号強度を保ったまま 4THz 程度の広帯域計測が可能

となる。このため、プローブレザーとして **Er** ファイバを用いたシステムを準備している。このレーザーの 2 倍波を用いることで **775nm** のフェムト秒レーザーを得ることができる。今後の展望としては、よりテラヘルツパルス強度を向上するべく、ターゲット材料等の最適化を推進するとともに、さらなる高度化のために共振器構造を付加し、自由電子レーザーのように発振させることを目指していく。