

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820139

研究課題名(和文) ランダムサンプリングによる高速THz-TDSシステムの開発

研究課題名(英文) Development of a rapid scan THz-TDS system by using random sampling method

研究代表者

古屋 岳 (Furuya, Takashi)

福井大学・工学部・技術職員

研究者番号：20401953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：THz-TDSにおいてポンプ光またはプローブ光の一方にレーザーの繰り返し1周期分の光学遅延を加えると、両光にはレーザーの発振タイミング揺らぎによりランダムに時間差が生じる。この時間差とTHz波信号強度を同時に測定できれば、時間差情報を基に高速THz-TDSシステム構築が可能となる。非線形光学結晶を用いたポンプ・プローブ光による和周波強度を測定し、タイミング差の情報を得た。THz波強度は光伝導アンテナを検出器とし、高速電流アンプと組み合わせ測定した。両データを同時に取得可能である事を実証し、1台のレーザーのみで機械式遅延等を必要としない高速THz-TDSシステムの実現の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：New rapid scan THz time domain spectrometer by using random sampling method. In this system, one cycle time delay added to the pump pulse, as a result the timing between pump and probe pulse was fluctuated by the laser timing jitter. The key points of this system, One is the measurement incident timing difference between pump and probe pulse. Another one is a weak signal measurement of THz wave intensity of each pulse. The timing difference between two pulses was measured by a cross-correlation method using nonlinear crystal. Measured sum frequency wave intensity of each pulse corresponds to the time difference between two pulses. THz wave amplitude was observed by a spiral type photoconductive antenna combined with a high speed response current amplifier. We achieved measurement of both signals of the sum frequency generation and THz wave at the same time. These results indicate a possibility for developing new type rapid scan THz time domain spectroscopy.

研究分野：テラヘルツ時間領域分光

キーワード：レーザー タイミングジッター テラヘルツ 高速測定

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) は 1 度の測定で幅広い周波数領域にわたり電磁波の透過強度 (または反射強度) および位相情報が得られることからセキュリティや品質管理への応用が期待される分光手法である。本手法の課題の一つとして波形取得に数秒から数分の測定時間を要することが挙げられる。分光時間の高速化についての研究は 2005 年ごろから様々な手法について提案されてきた。現在、高速測定で最も一般的に使用されている手法は非同期差周波同期サンプリング法 (ASOPS)¹ と呼ばれる繰り返し周波数のわずかに異なるレーザー 2 台を用いた手法であるが、レーザーを 2 台使用するためコスト面などの課題が挙げられる。そのほかにも 1 台のレーザーで高速測定を行う手法として、2 光に分離したレーザー光の一方にレーザー繰り返しの数周期に相当する時間遅延を与え、かつ機械的にレーザーキャビティ長を高速に変化させる事により、繰り返し周波数に変調を掛ける手法などが研究、報告されている²。申請者の所属研究室においても外部電気パルス駆動のフェムト秒レーザーを用い、繰り返し周波数に変調をかけることで最短で 3 ms の高速測定可能なテラヘルツ分光装置を開発してきたが、レーザーの発振タイミング揺らぎ (タイミングジッター) の問題で、十分なスペクトル帯域が確保できなかった。

2. 研究の目的

本研究では外部電気トリガ駆動のレーザーダイオードが数 ps 程度の比較的大きな発振タイミング揺らぎ (タイミングジッター) を有することを利用し、1 台のフェムト秒レーザーで、繰り返し周波数の掃引や機械式の時間掃引を行うことなく、テラヘルツ時間波形を取得可能な分光装置開発を目的とする。THz-TDS においてポンプ・プローブ光の一方にレーザー繰り返し 1 周期分に相当する光学遅延を与えた場合、不規則に発生するレーザーの発振タイミング揺らぎにより、ポンプ・プローブのタイミングにはランダムな時間差が生じる。この時間差 (タイミングジッター) をパルス毎に測定し、同時に THz 波強度をパルス毎に測定することができれば、タイミングのずれを時間軸として使用することにより THz 波形が取得可能となる。

3. 研究の方法

(1) パルスレーザーの発振タイミングジッターの測定

外部電気トリガ駆動のレーザー発振では、レーザーダイオード自身のタイミングジッターのほかにも使用するトリガ源のジッターがレーザーパルスのタイミングジッターの要因となる。複数の外部トリガを用い、非線形光学結晶による和周波の発生時間幅を機械式時間掃引により測定し、タイミングジッター

のトリガ依存性について検討、THz 波測定に必要な時間窓に対応するトリガ源を選定する。

(2) フェムト秒レーザーパルスに伸長をかけ、THz-TDS に必要な時間窓に相当するパルス幅を得る。

本研究では非線形光学結晶を用い、ポンプ・プローブ光による和周波強度から両行のタイミングのずれを取得する。THz-TDS に使用するレーザーのパルス幅は通常 100 fs 程度であり、和周波が発生する領域もパルス幅程度となる。一方で、THz-TDS を行うために必要な時間窓は 25 ps 程度であるため、パルス幅に比べ和周波発生領域は 2 桁程度小さい。時間窓に対応する和周波発生領域を確保するため、非線形光学結晶に入射するレーザーパルスの一方にパルス伸長を行う。伸長されたパルスとフェムト秒パルスを非線形光学結晶に入射し、和周波を測定することで、時間窓に必要なパルス伸長が得られていることを確認する。

(3) 通常の THz-TDS では THz 波の発生・検出に光伝導アンテナを使用するが、本研究では検出信号の信号対雑音比の向上が重要であるため、申請者の所属研究室において THz 波の信号感度向上に向け、研究が行われている非線形光学結晶によるヘテロダイン電気光学サンプリング法を利用し、プローブ光入射タイミングにおける THz 波の強度をパルスごとに測定する。

(4) THz-TDS による時間波形取得とパルス伸長後の和周波強度を同時取得し、本手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) レーザーのタイミングジッター測定では、内部電気トリガと外部電気トリガ 2 種の計 3 種類のトリガについて測定を行った。レーザーの繰り返し周波数は 40 MHz とし、レーザー光を 2 つに分離、一方にレーザー繰り返し 1 周期分の光学遅延を与え、両光を非線形光学結晶である BBO 結晶に入射、和周波を発生させる。2 つのレーザー光の非線形光学結晶への入射タイミングを機械式遅延で掃引し、和周波の発生する時間範囲からタイミングジッターを見積もった。測定結果を図 1 に示す。

内部トリガを用いた場合のジッターは半値全幅で 6.7 ps 程度であるのに対し、外部トリガでは最大 17 ps 程度の幅が確認された。THz 時間波形の時間幅はダイポール型の光伝導アンテナを用いた場合 25 ps 程度であることから、信号取得可能な範囲をジッターの 2σ とすれば、外部トリガを使用することで、テラヘルツ時間波形を測定するのに必要な時間幅においてジッターが発生可能であることを確認した。また、自己相関波形の測定において個々の和周波強度スペクトルを高速フォトダイオードで測定し、信号強度の時間揺らぎを測定した。その結果、パルス出力の

揺らぎとともに偏光変化による揺らぎが少なからず存在することが確認された。そのため、直線偏光フィルターを挿入し、偏光度を保ち、時間揺らぎを測定した結果、揺らぎ幅は2%程度に抑えられることを確認した。

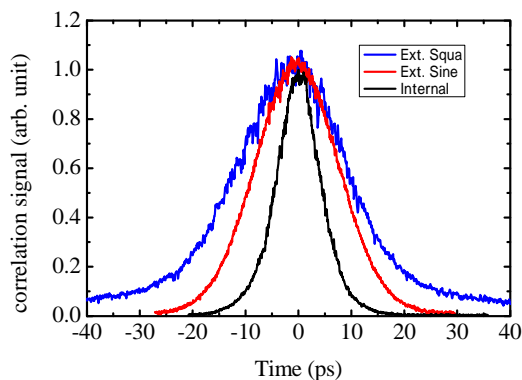


図1 相互相関波形測定結果

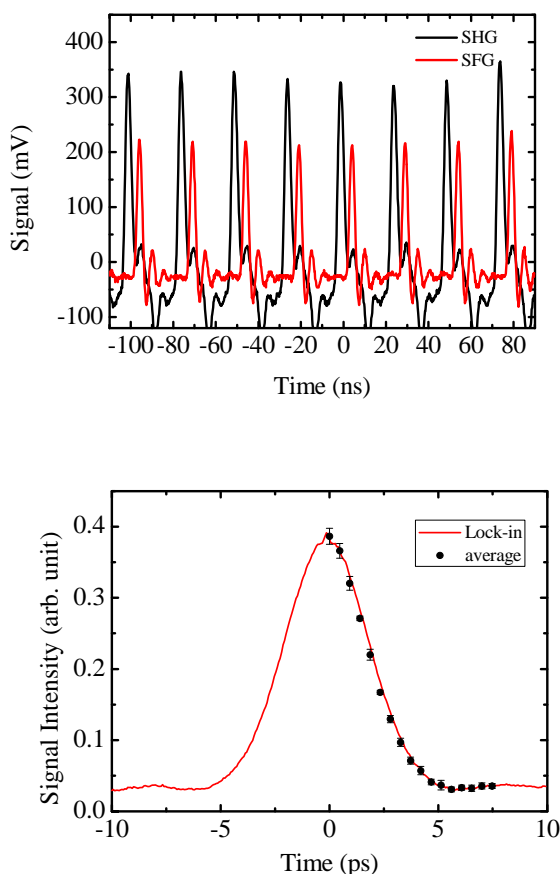


図2 和周波強度測定結果

上：フォトダイオード検出信号
下：ロックイン検出との比較結果，実践はロックイン検出信号，エラーバー付きのドットはサンプリングオシロスコープで直接観測した信号強度

(2) レーザーパルスの伸長には、一般的にパルス圧縮に利用されるグレーティングペアを利用した。グレーティングペアによる圧縮ではレーザーパルスの持つ幅広いスペクトルに対し波長ごとに光路長差をつけることで負の分散をかけ、正分散によって広がったレーザーパルスを圧縮することが可能となるが、今回は負の分散を過度に加えることによりパルスの伸長を行った。本実験では、最大で 10 ps のパルス伸長効果が得られた。しかしながら、今回のシステムではジッター測定用のレーザーパルスに2倍波発生モジュール透過後の基本波を使用したことおよび、レーザー光源の周波数スペクトルが均一でないことなどにより、伸長したパルスがガウス分布とはならず、和周波の強度スペクトルに凸凹が生じた。和周波発生強度を時間軸として使用する場合、和周波強度は2つのレーザー光の入射タイミングがずれていくのに対して、滑らかに増加または減少する必要がある。そこで、伸長後のパルスが時間軸に対し周波数が連続的に変化することに着目し、800 nm用のショートパスエッジフィルターを挿入し、低周波部分の信号強度の減衰を行った。この結果、多少強度分布がいびつな和周波スペクトルにおいてもフィルターによる補正により和周波強度が時間軸として使用可能であることを実証した。これまでも非線形光学結晶による和周波発生を用いたジッター測定は報告されていたが³、時間幅が数百 fs 程度であるのに対し、本実験により、フェムト秒レーザー使用時に、ps オーダーのジッターを測定可能であることが示され、今後のジッター測定を利用した様々な応用が期待できる。

(3) 本研究ではプローブ光パルスが検出素子に入射したタイミングにおける THz 波強度をパルスごとに測定する必要があり、測定には高い信号対雑音比が求められる。研究代表者の所属研究室では電気光学サンプリング法と金属のV溝構造を組み合わせることで、検出信号の対雑音比向上について研究を行っており、これまでに金属V溝構造により約20倍の信号増強を確認している。さらに、THzの信号を位相差として検出する従来の電気工学サンプリングに対し、プローブ光の強度変調としてTHz信号を検出するヘテロダイン電気光学サンプリング手法により、光学系の簡便化を図ってきた。本手法では従来の光伝導アンテナを用いた手法と同程度かそれ以上の信号対雑音比が期待できる。さらに、低温成長ガリウム砒素(LT-GaAs)を基板とした光伝導アンテナでは励起光源として800 nmのレーザー光が必要であり、ファイバーレーザーの基本波1550 nmを2倍波に変換する必要があるのに対し、ニオブ酸リチウムを非線形光学素子としたヘテロダイン電気工学サンプリングでは1550 nmのレーザー波長がそのまま利用できるため、高強度のプローブ光を用いることにより、高い信号対雑音比が

期待できる。なお、テラヘルツ発生には放射強度の高いスパイラル型の光伝導アンテナとし、励起光源は 1550 nm の基本波を周期的分極反転二オブ酸リチウム (PPLN) 結晶により 2 倍波に変換したパルス光を用いた。ポンプ側のレーザー強度は基本波と 2 倍波の混合で 100 mW, 2 倍波への変換効率から 800 nm の成分は数 mW 程度となる。プローブ光は波長 1550 nm 強度 120 mW である。得られた信号対雑音比は 3 程度であり、光伝導アンテナを用いた測定の 1/30 程度にとどまるもので

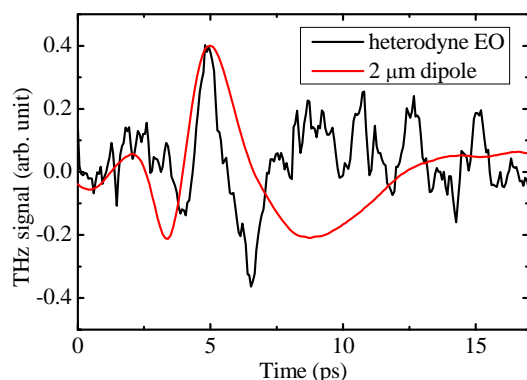


図3 ヘテロダイン EO 検出と光伝導アンテナ比較結果

あった。(図3) この原因を探るために、共振器型の中心波長 1550 nm のフェムト秒レーザーを用いてヘテロダイン電気工学サンプリングを行った。時間波形の信号対雑音比は 100 を超えており、先の結果が光学系や非線形光学結晶によるものではなくレーザーに起因するものであることが確認された。また、2 つのレーザー光のスペクトル分布を測定したところ、外部共振器型のレーザースペクトルは比較的均一な強度分布を示したのに対し、外部トリガ型のレーザーのスペクトルが不均一なスペクトルを示した。このことからスペクトル分布が今回の信号対雑音比低下の一因であると考えられる。

この結果を受け、検出に非線形光学結晶を用いることを断念し、テラヘルツ波発生素子と同じスパイラル型の光伝導アンテナを検出素子として用いることとした。これは、スパイラルアンテナから放射される THz 波が円偏光に近い偏光を持つのに対し、一般的なダイポール型やボウタイ型の光伝導アンテナでは偏光の一方方向のみに感度を有するため、検出効率が低下するためである。また、励起光源としては波長 800 nm のレーザーパルスが必要となるため、外部トリガ型レーザー付属の 2 倍波発生モジュールを用い、発生した 2 倍波を THz-TDS に使用し、モジュール透過後の基本波をタイミングジッター測定用の光源とすることとした。光伝導アンテナで検出した信号を高速電流アンプで増幅後、サンプリングオシロスコープで測定した。測定の結果、

本システムにおいて、パルス毎のテラヘルツ波強度が測定可能であることを確認した。

(4) THz-TDS およびレーザーの和周波発生を同時に行い、ロックイン検出信号とサンプリングオシロスコープで測定した信号の比較を行った。和周波および THz 波について同時に機械式の時間掃引を行い、各ポイントで 500 回積算し、サンプリングオシロスコープで測定した結果は、和周波強度および THz 波強度の信号を単独で機械式掃引によるロックイン検出を行った信号と良い一致を示した。この結果から、本手法により繰り返し周波数掃引や機械的な時間掃引を行うことなくテラヘルツ波形が取得できる可能性が示された。ただし、テラヘルツ時間波形および和周波発生信号は得られた信号微弱であったため、外部雑音によるパルスごとの信号揺らぎが大きく、信号取得には平均化が必要であった。和周波信号に関してはレーザー自身の強度揺らぎとともに和周波信号強度が小さいことによるノイズ成分の揺らぎの影響が無視できない状況であることから、和周波発生効率の向上などが課題として挙げられる。

参考文献

- 1) T. Yasui, E. Saneyoshi, and T. Araki: Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 061101.
- 2) R. Wilk, T. Hochrein, M. Koch, M. Mei, and R. Holzwarth: J. Opt. Soc. Am. B **28** (2011) 592.
- 3) M. C. Divall, P. Mutter, E. J. Divall, C. P. Hauri: Optics Express Vol. **23**, pp. 29929-29939 (2015)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

T. FURUYA, G. NIEHUES², S. TSUZUKI¹, S. OZAWA¹, S. AZUMA, S. FUNKNER, A. IWAMAE, K. YAMAMOTO², S. NISHIZAWA² and M. TANI
 “DEVELOPMENT OF HIGH SPEED AND HIGHLY SENSITIVE TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROMETER” 14th International Balkan workshop on applied physics, Romania constanta, july 1 july 3 (2014)
古屋 岳, 山本晃司, 谷 正彦
 “レーザー発振における各パルスのタイミングジッター測定” 2014年 日本応用物理学会 春季大会 青山学院大学 (相模原キャンパス) 3月17日 - 20日 (2014)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況（計 0件）

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

古屋 岳（FURUYA Takashi）
福井大学・工学部技術部・技術職員
研究者番号：20401953

(2)研究分担者

なし

研究者番号：

(3)連携研究者

なし