

多周波ヘテロダイン式テラヘルツ・コム分光法の開発 Multi-frequency-heterodyning, terahertz frequency-comb spectroscopy

○安井武史, 壁谷泰宏, 實吉永典, 横山修子, 荒木勉

○Takeshi Yasui, Yasuhiro Kabetani, Eisuke Saneyoshi, Shuko Yokoyama and Tsutomu Araki

大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

E-mail: t-yasui@me.es.osaka-u.ac.jp, http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/

We report a terahertz (THz) spectroscopy technique based on a stable THz frequency comb from a photoconductive THz emitter driven by a stabilized femtosecond laser. To this end, a photocurrent frequency comb is induced in a photoconductive THz detector by instantaneous photogating with another detuned femtosecond laser and is applied to reading out the THz frequency comb.

1. はじめに

近年、テラヘルツ領域 (THz 領域: 周波数 0.1~10THz、波長 30 μm ~3000 μm) において、ビタミン・糖・医薬品・農薬・禁止薬物・プラスチック爆弾・ガン組織を始めとした様々な物質が固有の吸収スペクトル (指紋スペクトル) を示すことが明らかになり、この THz 指紋スペクトルを利用した THz 分光法が新しい物質識別手段や品質評価手段として注目されている [1]。しかしながら、従来の THz 時間領域分光法 (THz-TDS) では、周波数分解能と測定時間がトレードオフの関係にある上に、高精度な分光計測が困難であった。本研究では、フェムト秒モード同期 (fs-ML) レーザーによって発生させたテラヘルツ (THz) パルスが周波数領域において安定な周波数コム・スペクトルを示すことに注目し、これを基準にした高精度・高分解な THz 分光法を報告する [2]。

2. 光周波数コムと THz コム

fs-ML レーザーから出力されるレーザー光は、時間領域において非常に安定した高繰返しのモード同期超短光パルス列を示す (図 1)。一方、フーリエ変換の関係にある周波数領域では、多数の安定な光周波数モード列がモード同期周波数 ($=f_1$) の間隔で規則的に櫛 (コム) の歯状で並んだ離散スペクトル構造を有している。このようなスペクトル構造を周波数コムと言い、特に fs-ML レーザーから発せられた光周波数領域のコムをフェムト秒光周波数コムと呼ぶ。このような fs-ML レーザー光を光伝導アンテナ (または非線形光学結晶) に照射すると広帯域コヒーレントな THz 光が発生し、時間領域では fs-ML レーザー光に同期した THz 領域のモード同期パルス列が観測される。一方、周波数領域における THz 放射は、光伝導アンテナを介したフェムト秒光周波数コムの超広帯域復調と見なすことができ、その超高速応答性の結果、モード同期周波数の基本波成分 ($=f_1$) と多数の高調波成分 ($=2f_1, 3f_1, \dots, nf_1$) が等間隔で立ち並んだ高調波コムが THz 領域に生成されることになる。この THz 領域に展開された周波数コムである『THz コム』は、広い周波数選択性・非常に高いスペクトル純度・直接的絶対周波数較正・周波数通倍機能・単純性といった特徴を有している。したがって、この THz コムを高度に安定化することにより『THz 領域において正確に値付けされた電磁波周波数の物差し』が実現できれば、これを『テラヘルツ分光計測の目盛り』として利用することにより、極めて高いスペクトル精度とスペクトル分解能を有する超精密 THz 分光が可能になる。

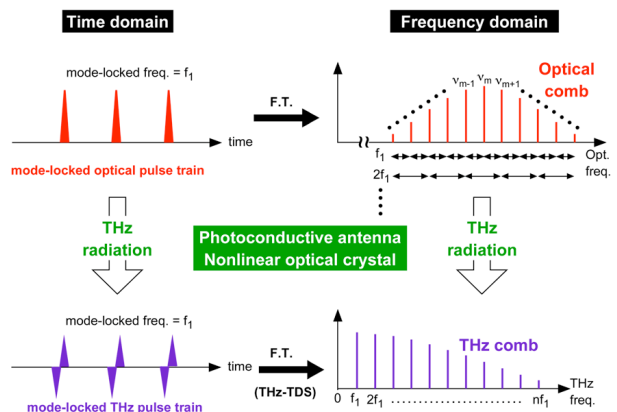


Fig. 1 Optical frequency comb and THz comb

3. 測定原理及び実験装置

装置図及び測定原理を図 2 及び図 3 に示す。通常の THz-TDS では 1 台の fs-ML レーザーを用いるが、本手法では THz コム発生用と THz コム読み出し用に 2 台の独立した fs-ML レーザー (ポンプレーザー: モード同期周波数 $=f_1$ 、プローブレーザー: モード同期周波数 $=f_2$) を用いる。ここで、それぞれのモード同期周波数が $\Delta f (=f_1-f_2)$ だけわずかに異なるようにレーザー制御を行うと、光周波数領域ではコム間隔が異なる

る2つの光周波数コムが生成されることになる。ポンプレーザー光をTHzコム発生用光伝導アンテナに入射すると、THzコム(周波数間隔= f_1)が放射される。一方、プローブレーザー光をTHzコム検出用光伝導アンテナに入射すると、超短パルス光による繰返し超高速光スイッチングの結果、光伝導アンテナ内に光励起電流の周波数コム(PCコム,周波数間隔= f_2)が生成される。このPCコムはちょうど周波数帯域的にTHzコムと同じ領域に存在するので、このようなPCコムが誘起された光伝導アンテナにTHzコムが入射されると、両者の相互作用(多周波ヘテロダイン光伝導検出)により、両コムのビート周波数(= Δf)を周波数間隔とする2次的な周波数コム($\Delta f, 2\Delta f, 3\Delta f, \dots, n\Delta f$)がRF領域に電気信号として発生することになる(RFコム)。このRFコムの周波数スケールは、THzコムの周波数スケールをある周波数縮小比率(= $f_1/\Delta f$)で正確にダウンスケリングしたものであるので、このRFコムをスペクトラム・アナライザーで直接観測し、周波数軸を周波数縮小比率でリスケールすることにより、THzコムが正確に再現できる。このようにして再現されたTHzコムの精度はコム周波数間隔(モード同期周波数)及び周波数縮小比率の両安定性によって決定されるので、周波数標準器(ルビジウム原子時計)を参照信号源とした超精密レーザー制御によって f_1, f_2 及び Δf を極安定化することにより、極めて高精度かつ高安定な分光計測が可能になる。一方、スペクトル分解能はTHzコムの単位目盛りであるモード同期周波数(= f_1)となる。

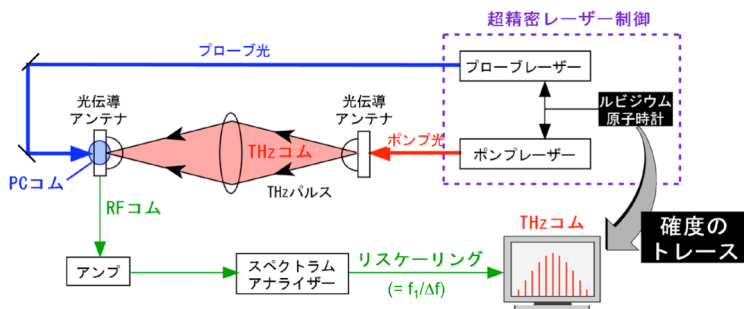


Fig. 2 Experimental setup

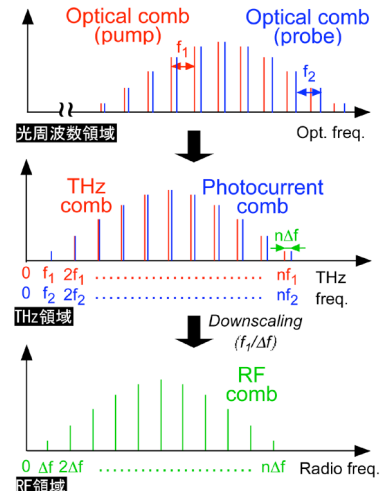


Fig. 3 Principle

4. 実験結果

図4はスペクトラム・アナライザーで測定されたRFコムであり、グラフの上部水平座標はRFスケール、下部水平座標はリスケールされたTHzスケールをそれぞれ示している。狭帯域なボウタイ型光伝導アンテナをTHz発生及び検出に利用しているため、スペクトル帯域がサブTHz領域に制限されているものの、THzコム・スペクトルが確認できる。挿入図は0.0462~0.0468THzの領域を拡大したものである。モード同期周波数(81.8MHz)間隔で7本のTHzコム・モードが確認できる。また、各モードの絶対周波数の精度は、周波数縮小比率の安定性から 10^{-7} である。

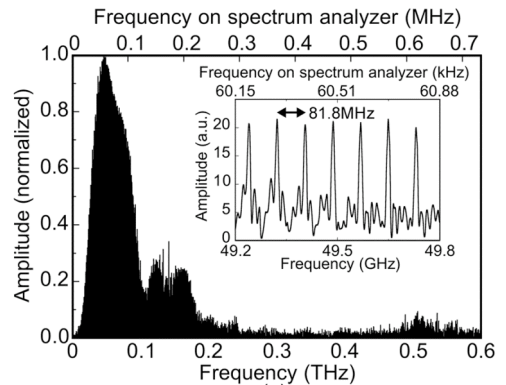


Fig. 4 Amplitude spectrum of THz comb

5. まとめ

THzコム分光法は完全な周波数領域分光法であるので、従来のTHz-TDSにおいて測定時間短縮のボトルネックとなっていた機械式時間遅延走査やTHz電場時間波形のFFT処理を必要とせず、THz振幅スペクトルを直接かつ高速に測定することが可能である。

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)及び科学研究費補助金(課題番号18686008、18650121)より援助を受けた。

文献

- [1] 例えば、『"開拓"進むテラヘルツ領域』, 光学, 34巻9号, pp. 449-480 (2005).
- [2] T. Yasui et al, "Terahertz frequency comb by multi-frequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy", Appl. Phys. Lett., Vol. 88, 241104 (2006).