

Title	テラヘルツ周波数コム分光法
Author(s)	壁谷, 泰宏; 実吉, 永典; 横山, 修子 他
Citation	大阪大学低温センターだより. 2006, 135, p. 18-22
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7811
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

テラヘルツ周波数コム分光法

基礎工学研究科 横山 修子、壁谷 泰宏、実吉永典、
安井 武史、荒木 勉 (内線6217)

近年、テラヘルツ波 (THz波; 周波数 = 0.1 ~ 10THz、波長 = 30 ~ 3000 μm) が、基礎科学分野だけでなく各種応用分野からも注目されている。我々の研究室では、光波と電波の両性質を併せ持つ『光電波』ともいふべきそのユニークな特徴に注目し、光応用計測という観点から、THzパルスを用いた新規計測手法の開発 (非同期光サンプリング式THz時間領域分光法^[1]、実時間2次元THz断層イメージング^[2]、光切断式実時間THz分光イメージング^[3]ほか) 及び応用計測 (塗装膜計測^[4]、皮膚計測^[5]、微量水分量計測^[6]ほか) に関する研究を行っている。ここでは、我々が最近開発した周波数コムを基準とした超精密THz分光法^[7]を紹介する。

フェムト秒モード同期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、特にフェムト秒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。近

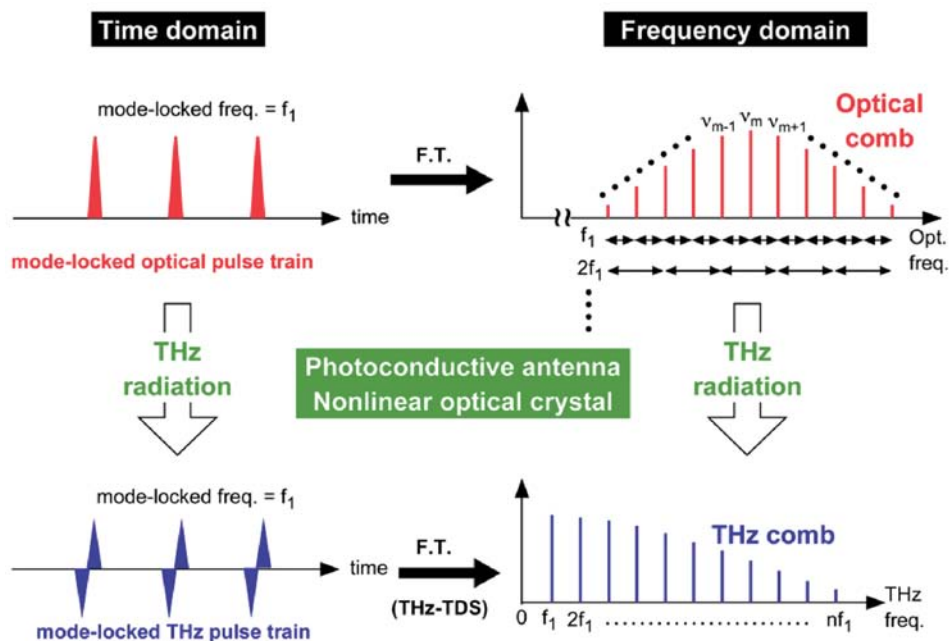


図1 光周波数コムとTHzコム

年、このフェムト秒光周波数コムを『光周波数の物差し』と見立てた超精密分光や周波数標準に関する研究^[8]が非常に注目されており、2005年には関連技術を開発したテオドール W. ヘンシュ博士（ドイツ）とジョン L. ホール博士（アメリカ）がノーベル物理学賞を受賞している。このようなフェムト秒レーザー光を光伝導アンテナ（または非線形光学結晶）に照射するとコヒーレントなTHz波が発生し、時間領域ではフェムト秒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・周波数逡倍機能・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『THz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確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。

THzパルスを用いた代表的分光法であるTHz時間領域分光法（THz-TDS）では、THzパルス電場の時間波形を時間分解測定し、それをパソコンで高速フーリエ変換（FFT）することにより振幅及び位相の周波数スペクトルを得ていた。一方、周波数コムに基づいた周波数領域測定を導入すると、THzパルス電場の時間波形を取得せずとも、直接スペクトルを得ることができる。このようなTHzコム分光法を実現するため、以下に示す2つの要素技術の開発を行っている。

(a) 極めて正確で長い周波数物差しの作成（ブロードバンドTHzスタンダード・コム）

THzコム分光法を実現するためには、まず正確で長い電磁波周波数の物差し、すなわち『ブロードバンドTHzスタンダード・コム』を作る必要がある。THzコムの安定化は、フェムト秒モード同期レーザーの超精密制御技術を用いて光周波数コムを安定化することにより実現できる。これまでに、コム間隔が参照信号源のルビジウム原子時計（確度 5×10^{-11} 、安定度 2×10^{-11} ）と同等に安定な周波数コムすなわち『スタンダード・コム』を達成している。一方、パルス幅10フェムト秒以下の極超短フェムト秒パルスレーザーを光伝導アンテナ（または非線形光学結晶）に照射することにより、THzコムのブロードバンド化を実現できる^[9]。このようなTHzコムの安定化技術と広帯域化技術を融合することにより、周波数だけでなく位相や強度までも安定で高品質なブロードバンドTHzスタンダード・コムを実現する。

(b) 周波数物差しの極めて正確な目盛り読み取り（多周波ヘテロダイン光伝導検出）

THzスタンダード・コムを有効利用するためには、周波数コム目盛りの正確な読み取り技術の確立も必要である。THzコムの検出には光伝導アンテナを利用するが、光伝導アンテナ後段の検出エレクトロニクスの周波数帯域制限より、THzコム全帯域のスペクトル（1THz以上）を直接取得するのは不可能である。そこで、このTHzコムを周波数計測機器（例えば、スペクトラム・アナライ

ザー)で直接計測できる電波周波数(RF)帯まで正確に周波数ダウンスケーリング可能な多周波ヘテロダイン光伝導検出法を開発した。装置図及び装置原理を図2及び図3に示す。通常のTHz-TDSシステムでは1台のフェムト秒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台の独立したフェムト秒レーザー(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 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コムが入射すると、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(= f)を周波数間隔とする2次的な周波数コム($f, 2f, 3f, \dots, nf$)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 / f)で正確にダウンスケーリングしたものであるため、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リングすることにより、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コムの確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 f を極安定化することにより、極めて高確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。

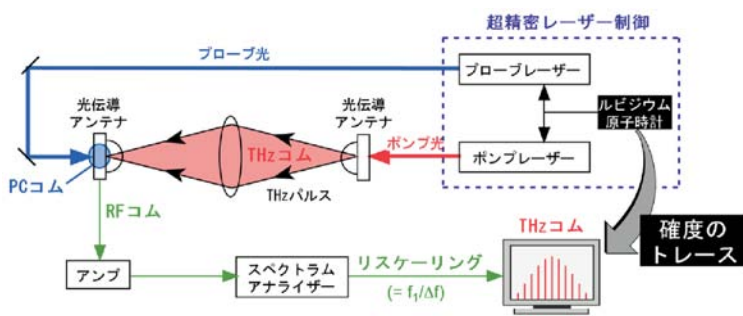


図2 実験装置

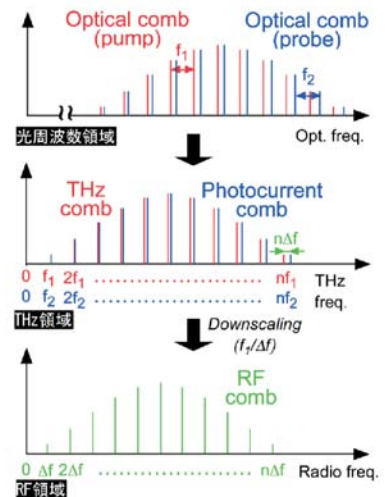


図3 測定原理

これまでの研究成果の一例を図4に示す。図4(a)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リングされた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

ているので、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（81.8 MHz）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確度は、周波数縮小比率の安定性から 10^{-7} である。図4(b)は、THz検出素子をボウタイ型からダイポール型光伝導アンテナに変更した場合のTHzコム・スペクトルを示している。1THz以上のスペクトル帯域が得られていることが確認できる。このような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。

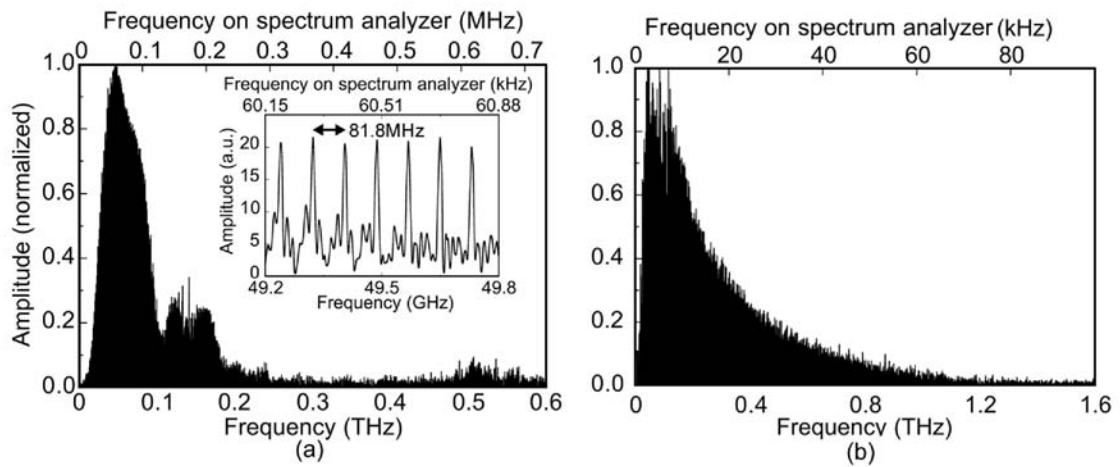


図4 THzコム・スペクトル

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。

参考文献

- [1] T. Yasui, E. Saneyoshi and T. Araki, "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, 061101 (2005).
- [2] T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki and E. Abraham, " Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects ", *Opt. Comm.*, (in revision).
- [3] K. Sawanaka, T. Yasui, T. Yasuda, and T. Araki, "Real-time one-dimensional terahertz time-domain spectroscopic imaging", *Proc. The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz 2005)*, Williamsburg, Virginia USA, September 19-23, TC5-18, pp. 325-326 (2005).
- [4] T. Yasui, T. Yasuda, K. Sawanaka, and T. Araki, "A terahertz paintmeter for non-contact monitoring of thickness and drying progress in paint film", *Appl. Opt.*, Vol. 44, pp. 6849-6856 (2005).
- [5] 安井武史、東野義之、荒木勉, " テラヘルツ電磁波パルスを用いた非接触・局所皮膚水分量測定の開発 ", *生体医工学*, Vol.42, pp.190-194 (2004).
- [6] T. Yasui and T. Araki, "Sensitive measurement of water content in dry material based on low-frequency terahertz time-domain spectroscopy", *Proc. SPIE*, Vol. 6024, pp. 69-74 (2005).
- [7] T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyosh, S. Yokoyama, and T. Araki, "Terahertz frequency comb by multi-frequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.*, (in accept).
- [8] Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, " Optical frequency metrology ", *Nature* Vol. 416, 233-237 (2002).
- [9] Y. C. Shen, P. C. Upadhyya, H. E. Beere, and E. H. Linfield, A. G. Davies, I. S. Gregory, C. Baker, W. R. Tribe, and M. J. Evans, " Generation and detection of ultrabroadband terahertz radiation using photoconductive emitters and receivers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, 164-166 (2004).