

フェムト秒光サンプリング式テラヘルツ・コム計測法に関する研究開発 (042107005)

Research and development of terahertz frequency comb measurement based on femtosecond optical sampling method

研究代表者

安井 武史 大阪大学大学院基礎工学研究科

Takeshi Yasui Graduate School of Engineering Science, Osaka University

研究期間 平成 16 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

高度情報通信における光波と電波の融合をさらに促進させるため、光波—電波境界のテラヘルツ帯における技術的ギャップを埋める手段として、テラヘルツ・コム計測法を開発する。テラヘルツ・コムは、広い周波数選択性・多チャンネル性・非常に高いスペクトル純度・直接的絶対周波数校正・周波数通倍機能・単純性といった特徴を有していることから、これを『テラヘル領域における周波数の物差し』として利用できると、次世代情報通信において非常に有用な手段になることが期待される。本研究では、安定化テラヘルツ・コム光源とフェムト秒光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光法の複合により、テラヘルツ・コムから単一の周波数モードを選択抽出し計測する技術の確立を目指す。

Abstract

Terahertz (THz) frequency comb has attractive features as a new means of communication in THz region, such as broadband spectrum, multi-channel, high spectral purity, frequency multiplication, and simplicity. To achieve a new communication based on THz comb, we have developed fundamental techniques of THz comb, including asynchronous optical sampling (AOS) laser source, AOS THz time-domain spectroscopy, THz frequency comb spectroscopy using multi-frequency heterodyning photoconductive detection, and control of THz frequency comb using pulse shaping technique in optical region. The proposed techniques will be powerful tools to bridge THz gap of information and communications technology and promote harmony between electrical and optical communications.

1. まえがき

現在の高度情報通信社会におけるブロードバンド化の波は、情報伝達量に対する要求を加速度的に増大させている。これまで、光周波数領域では波長(周波数)多重通信の多チャンネル化によって超高速大容量通信に対応してきたが、今後予想される更なるブロードバンド化に対して既存の電磁波エネルギーの利用だけでは限界がある。1つの解決策が利用する通信電磁波周波数帯の拡張であり、光波と電波の境界に位置するテラヘルツ領域(THz 領域: 周波数 0.1~10THz、波長 30~3000 μ m)は有望な通信電磁波エネルギーの1つである。しかし、THz 領域はこれまで良質なレーザー光源や高感度検出器がなかったため未開拓な電磁波領域であり、情報通信における『THz ギャップ』とされてきた。しかし、最近の安定なフェムト秒パルスレーザーの出現と超高速光技術の発達により THz 領域の超短パルス(THz パルス)の発生及び検出が常温で可能になり、この領域の研究開発が加速している。

THz パルスは、時間領域において非常に安定した高繰返しモード同期超短パルス列を示す。一方、フーリエ変換の関係にある周波数領域では、多数の安定な周波数モード列がモード同期周波数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呼ぶ。この THz 領域に展開された周波数コムである『THz コム』の櫛の歯状離散スペクトル構造に着目すると、コム・モード数に等しい周波数(波長)チャンネルを有する波長多重通信光源としての特徴を有していると言え、これをベースにすることにより THz 帯での波長多重通信が実現可能になる。

2. 研究内容及び成果

多周波ヘテロダイン光伝導検出を用いた THz コム分光法の測定原理を図 1 に示す。フェムト秒非同期光サンプリ

ング光源からは、コム間隔が異なる 2 つの光コム(ポンプ光、プローブ光)が生成される。ポンプ光を THz 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、プローブ光を THz コム検出用光伝導アンテナに入射すると、光伝導膜中にフォトキャリアの周波数コム(PC コム、周波数間隔= f_2)が生成される。この PC コムもまた THz コムと同じ周波数帯域を持つ高調波コムであるので、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)をコム間隔とする 2 次元的周波数コムが RF 領域に微弱電流信号として発生する。ここで、ゼロ付近の周波数成分($\Delta f, 2\Delta f, 3\Delta f, \dots, n\Delta f$)のみを抽出すると、THz コムと同様な高調波コムが観測される

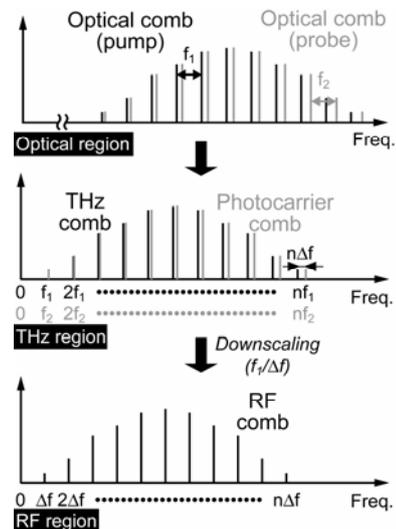


図 1 測定原理

(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 ($=f_1/\Delta f$) でダウンスケールしたものである。この RF コムを電流-電圧変換後にスペクトラム・アナライザで直接観測し、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 コムの正確な再現が可能になる。このようにして再現された THz コムの確度はコム間隔 (モード同期周波数) の差周波の安定性によって決定される。一方、スペクトル分解能はコム間隔であるモード同期周波数 ($=f_1$) となる。

研究成果の一例を以下に示す。フェムト秒非同期光サンプリング光源 ($f_1=81.8\text{MHz}$, $f_2=81.8\text{MHz}+100\text{Hz}$, $\Delta f=100\text{Hz}$) はルビジウム周波数標準と同程度まで安定化制御されている。THz 発生及び THz 検出にはボウタイ型光伝導アンテナを各々使い、RF コムは電流電圧変換アンプで増幅後、スペクトラム・アナライザで測定した。図 2(a) は、実際の RF コムであり、グラフの上側水平座標はスペクトラム・アナライザのスケール (RF スケール) を示している。1MHz 以下の周波数帯域に RF コムが存在しているのを確認できるが、これを周波数縮小比率 ($=f_1/\Delta f=818,346.30$) でリスケールされた THz スケールを下側水平座標に示す。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。図 2(a) の THz コム・スペクトルにおいて内部が塗りつぶされているのは、この中に 3000 本以上の THz コム・モードが密集しているからである。そこで、0.0462~0.0468THz の領域を周波数的に拡大したものが図 2(b) である。モード同期周波数 (81.8MHz) で等間隔に並んだ 7 本の THz コム・モードが確認できる。ここで、各コム・モードの絶対周波数の確度は 2.5×10^{-7} 、スペクトル分解能は 81.8MHz である。次に、THz コム・スペクトルのさらなる広帯域化のため、実験装置の一部を修正した。まず、THz 検出用光伝導アンテナには広帯域なダイポール型を用い、電流電圧変換アンプは狭帯域・高ゲインなタイプに変更した。広帯域化された THz コム・スペクトル (RF コム・スペクトル) が電流電圧変換アンプの帯域内に収まるように、 Δf を 100Hz から 5Hz に変更し、周波数縮小比率 ($f_1/\Delta f$) を 16,366,926 まで拡大した。その結果得られた THz コム・スペクトルが図 2(c) であり、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。

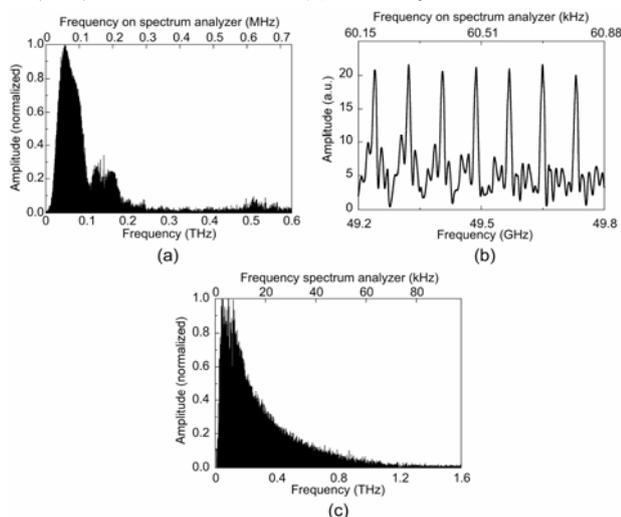


図 2 THz コム・スペクトル。(a)狭帯域 THz コム、(b) THz コム・モード、(c)広帯域 THz コム。

3. むすび

THz コムを用いた波長多重通信の実現に必要な各種要素技術 (フェムト秒非同期光サンプリング光源、非同期光サンプリング式 THz 時間領域分光法、多周波ヘテロダイナ光伝導検出を用いた THz コム分光法、光パルス整形技術を用いた THz コム制御法ほか) の開発を行った。今後、各技術をさらに高度化させると共に有機的融合を実現させることによって、THz 帯波長多重通信の実現が期待される。

【誌上发表リスト】

- [1] T. Yasui, E. Saneyoshi and T. Araki, "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition", Applied Physics Letters Vol. 87 No.6 pp061101 (2005 年 8 月 1 日)
- [2] T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyoshi, S. Yokoyama, and T. Araki, "Terahertz frequency-comb by multi-frequency heterodyning photoconductive detection for THz spectroscopy", Applied Physics Letters Vol. 88 No.24 pp 241104 (2006 年 6 月 13 日)
- [3] T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects", Optics Communications Vol. 267 No.1 pp 128-136 (2006 年 6 月 21 日)

【申請特許リスト】

- [1] 安井武史、荒木勉、安田敬史、実時間テラヘルツモグラフィ装置および分光イメージング装置 (特願 2005-34471, PCT/JP2005/15868)、日本・アメリカ、2005 年 2 月 10 日
- [2] 安井武史、荒木勉、實吉永典、高分解・高速テラヘルツ分光計測装置 (特願 2005-55367, PCT/JP2005/15791)、日本・アメリカ、2005 年 3 月 1 日

【受賞リスト】

- [1] Ken-ichi Sawanaka, Best Student Paper Award (International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005), "Real-time one-dimensional terahertz time-domain spectroscopic imaging", 2005 年 7 月 11 日
- [2] 實吉永典、第 18 回 (2005 年春季) 応用物理学会講演奨励賞、"光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光法 (II) -テラヘルツ電磁波パルスの検出-", 2005 年 9 月 7 日
- [3] 安井武史、東野義之、荒木勉、平成 17 年度日本生体医工学会論文賞・阪本賞、"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"、2006 年 5 月 11 日

【報道発表リスト】

- [1] "Terahertz pulses watch paint dry", WEB サイト記事 <http://optics.org/articles/news/11/11/17/1>、2005 年 11 月 23 日
- [2] "テラヘルツ用いた光の物差し/10 秒で時間波形/物質判別など応用可能"、日刊工業新聞 (第 33 面)、2005 年 11 月 24 日
- [3] "驚きの透視パワー 不思議の波 テラヘルツ"、NHK 教育テレビ・サイエンスゼロ、2007 年 2 月 17 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/research/thz/index.html