

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：16101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860029

研究課題名（和文）マイクロ波周波数標準に位相同期した広帯域テラヘルツ・シンセサイザーの開発

研究課題名（英文）Broadband terahertz synthesizer phase-locked to a microwave frequency standard

研究代表者

ジェワリヤ ムケシュ (JEWARIYA MUKESH)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・助教

研究者番号：20608773

研究成果の概要（和文）：光コムにCWレーザーを位相同期することにより、光領域で狭線幅かつ波長可変な光シンセサイザーを2組構築した。光周波数固定用光シンセサイザーと光周波数走査用光シンセサイザーの出力光をUTC-PD（Fバンド）でフォトミキシングすることにより、その光周波数差に相当するCW-THz波を生成した。発生したCW-THz波の絶対周波数は、マイクロ波周波数標準を基準として12桁の不確かさで付与され、1GHz以上の連続チューニングが可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：We first constructed a pair of optical frequency synthesizer (OFS) by phase-locking two CW near-infrared lasers to two optical frequency combs, respectively. Then, CW-THz wave was generated by photomixing output lights from OFSs with UTC-PD. Absolute frequency of the generated CW-THz wave was determined at uncertainty of  $10^{-12}$  by referencing to a microwave frequency standard. Furthermore, its output frequency was successfully tuned over 1 GHz.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総額	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：応用光学・量子光工学、計測工学、光源技術、超精密計測、テラヘルツ/赤外材料・素子

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 領域 (周波数: 0.1~10THz、波長: 30~3000 $\mu$ m) は、構成原子数の少ない軽い分子の吸収線スペクトルが現れる特徴的な周波数帯であり、大気中の様々な分子（酸素、水蒸気、オゾン、一酸化炭素、水素関連分子、窒素関連分子、塩素関連分子、硫黄関連分子など）の回転遷移に伴う吸収スペクトル線がこの領域に数多く存在している。近年、自動車等の排気ガスを始めとして、オゾン層破壊・地球温暖化・気候変化・大気汚染・森林火災や火山活動による大気組成の変

化など地球環境の重大問題を解明する上で、大気の化学組成を知りその生成消滅に関わる多様な化学反応を追跡可能な THz 分光法が注目されている。THz 領域にひしめきあうように存在している様々な分子を詳細に識別し定量するためには、極めて高いスペクトル精度とスペクトル分解能を有し、THz 領域をフルカバー可能な分光法が望まれる。

THz 領域の代表的分光法として、超短 THz パルスを用いた THz 時間領域分光法 (THz-TDS) と周波数可変 CW-THz 波を用いた THz 周波数領域分光 (THz-FDS) がある。単一

THz パルスの電場時間波形をフーリエ変換することによってスペクトルを取得する THz-TDS では、広帯域なスペクトル (1THz 以上) を一度に取得できるが、機械式ステージの移動量に基づいてスペクトルの目盛り付けを行うため、確度 ( $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$ ) や分解能 (20~30GHz) が低い。一方、THz-FDS では、光周波数がわずかに異なる近赤外 CW レーザー光をフォトミキサーでフォトミキシングすることにより周波数可変 CW-THz 波を発生させて分光を行うが、そのスペクトル確度とスペクトル分解能は、利用する近赤外 CW レーザーの性能に大きく依存する。従来は、安定化制御を行わないフリーランニング近赤外 CW レーザー光が用いられてきたので、十分に高いスペクトル分解能やスペクトル確度を得ることが困難であった。もし、これらの近赤外 CW レーザーの光周波数を十分に安定化し、かつ精密に光周波数走査できれば、大気ガス分析にも利用可能な超精密 THz シンセサイザーが実現できるであろう。

## 2. 研究の目的

THz 領域にひしめき合うように密集する吸収線群を正確に識別するためには、光源である THz シンセサイザーの発生周波数が狭線幅かつ波長可変であるだけでなく、その絶対値が周波数標準にトレーサブルであることが望まれる。本研究では、波長可変 CW-THz 波の発生技術として広く用いられるフォトミキシング技術に対して、超精密分光や光周波数標準の分野において革命的進展をもたらした光周波数コム技術を導入することにより、マイクロ波周波数標準に位相同期した THz シンセサイザーを開発する。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず、フェムト秒ファイバーレーザーをマイクロ波周波数標準器に位相同期することにより、光周波数の超精密周波数物差しである光周波数コムを構築する。次に、波長可変 CW レーザーを光周波数コムに位相同期することにより、原子時計の不確かさで光周波数の絶対値が付与された光シンセサイザーを構築する。最後に、光周波数差が THz オーダーに設定された 2 台の光シンセサイザーの出力光をフォトミキシングすることにより、光周波数差に等しい出力周波数を有する THz シンセサイザーを実現する。

### (a)デュアル光コムの構築

光コムの  $m$  次モードの絶対周波数 ( $f_m$ ) は、 $f_m = f_{\text{ceo}} + m \cdot f_{\text{rep}}$  として与えられるので、光周波数物差しとして利用するためには、モード同期周波数 ( $f_{\text{rep}}$ ) とキャリア・エンベロープ・オフセット周波数 ( $f_{\text{ceo}}$ ) の安定化が必要になる。

$f_{\text{rep}}$  の安定化制御では、ファイバーレーザ

ー発振器の出力光の一部を高速光検出器で検出し、 $f_{\text{rep}}$  の高次高調波成分とマイクロ波シンセサイザーを電氣的にミキシングすることにより、 $f_{\text{rep}}$  の高次高調波成分を RF 帯のビート信号として抽出する。このビート信号を制御信号として用いた PLL 制御により、ファイバー共振器長をピエゾ素子で安定化する。ここで、マイクロ波シンセサイザー及び PLL 制御用参照信号に外部同期信号として原子時計出力信号を与えることにより、 $f_{\text{rep}}$  すなわち光コム間隔を原子時計に位相同期する。

一方、 $f_{\text{ceo}}$  の安定化制御では、ファイバーレーザー発振器の出力光をフェムト秒ファイバー増幅器で増幅した後、高非線形ファイバーに入射することにより広帯域白色コンテナム光を発生させ、スペクトル帯域を 1 オクターブ以上広げる。さらに、非線形光学結晶で波長変換した後、 $f-2f$  干渉計の干渉信号を光検出器で検出することにより、 $f_{\text{ceo}}$  を抽出する。 $f_{\text{ceo}}$  が一定値となるように、ファイバーレーザー発振器励起用半導体レーザーの出力パワーを制御する。このようにして 2 台の独立した光コムであるデュアル光コムを実偏する。

### (b)デュアル光シンセサイザーを用いた CW-THz 波の発生

2 台の波長可変 CW レーザーをデュアル光コムにおおのに位相同期するため、CW レーザー光とそれに最隣接した光コム・モードのビート信号を抽出する。この信号を制御信号とし、マイクロ波原子時計から合成された基準信号と周波数・位相比較を行い、CW レーザーを光コムに位相同期する。その結果、原子時計の不確かさで光周波数の絶対値が付与されたデュアル光シンセサイザーを構築する。

最後に、光周波数差が THz オーダーに設定されたデュアル光シンセサイザーの出力光を UTC-PD でフォトミキシングすることにより、光周波数差を出力周波数に有する THz シンセサイザーを実現する。

## 4. 研究成果

### (a)デュアル光コムの構築

まず、 $f_{\text{rep}}$  の安定化制御を行った。図 1 は、安定化制御を行った場合とフリーランニングの場合の  $f_{\text{rep}}$  安定性を比較した結果である。今回の安定化制御システムにより、 $f_{\text{rep}}$  の周波数安定性が大幅に向上していることが分かる。実現された周波数安定性は、タイムベースとして用いたマイクロ波周波数標準の性能によって制限されている。

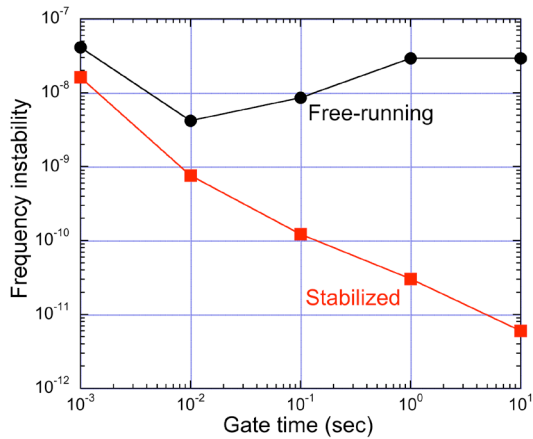


図1  $f_{rep}$ の周波数安定性

次に、 $f_{ceo}$ の安定化制御を行った。図2は、 $f-2f$ 干渉計によって抽出された $f_{ceo}$ 信号のRFスペクトルを示しており、良好な測定SN比で信号が検出できている。これを制御信号として、 $f_{ceo}$ の安定化制御を行った。図3は、 $f_{ceo}$ の安定化制御を行った場合と行っていない場合の周波数安定性を比較したものである。 $f_{rep}$ と同様に、 $f_{ceo}$ の周波数安定性も安定化制御により大きく向上している。このようにして、デュアル光コム構築に成功した。

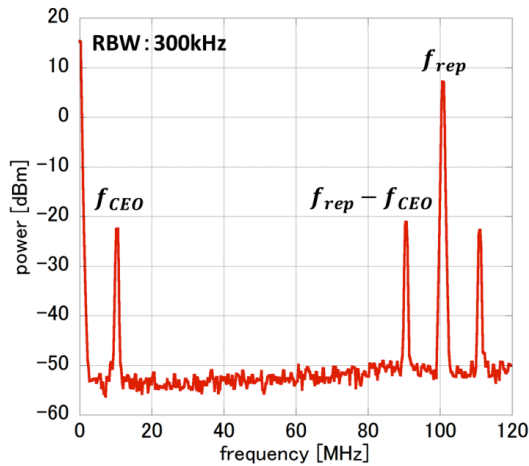


図2  $f_{ceo}$ のRFスペクトラム

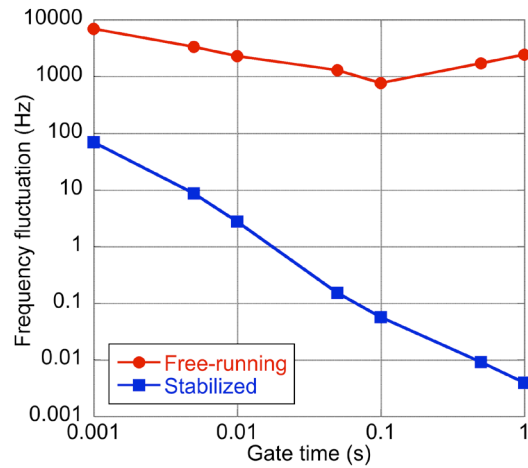


図3  $f_{ceo}$ の周波数安定性

### (b) デュアル光シンセサイザを用いたCW-THz波の発生

まず、デュアル光コムに対して、2台の単一モードCWレーザーを位相同期した。これにより、光コムが有する周波数不確かさ（マイクロ波周波数標準と同等）がCWレーザー光にトランスファーされたデュアル光シンセサイザを実現した。デュアル光シンセサイザの一方を光周波数固定光源、他方を光周波数チューニング光源として用いる。光周波数チューニング用光シンセサイザでは、CWレーザーの位相同期を保った状態で、光コムの周波数間隔を走査することにより、最大で1.7THzの連続チューニングが光領域で可能である。

次に、デュアル光シンセサイザの光周波数差を0.14THzで安定化した状態で、両レーザー光を光ファイバーで空間的に重ね合わせ、干渉により0.14THzの光ビート信号を生成する。そして、この光ビート信号を単一走行キャリア・フォトダイオードでフォトミキシングすることにより、光ビート周波数に等しいCW-THz波（平均出力250 $\mu$ W）を自由空間に放射させた。このCW-THz波のスペクトル特性をTHzコム参照型スペクトラム・アナライザにより評価したところ、図4に示すように、スペクトル形状はガウス型で、スペクトル幅は約0.6MHzであった。次に、光コムを基準として絶対値が付与されたデュアル光シンセサイザの光周波数差から絶対値を決定したところ、140,003,403,918Hzであった。

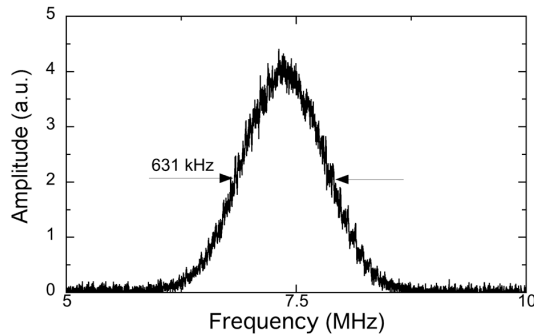


図4 CW-THz波のRFスペクトル波形

最後に、一方の光シンセサイザの光周波数を厳密に一定に保ちながら、他方の光シンセサイザに用いている光コムモード間隔を変化させることにより光周波数のステップ走査を行った結果を図5に示す。ここでは、コム間隔を0.2Hz刻みで変化させることにより、CW-THz波の周波数を762,281.6Hz刻みで走査した。更に、1GHzを超える連続チューニングの様子を、リアルタイム・モニタリングすることにも成功している。周波数走査用光シンセサイザは最大1.7THzの光周波数走査が可能であるので、広帯域フォトミキサー（光伝導アンテナなど）を用いることにより、1THzを超える連続チューニングが可能になる。

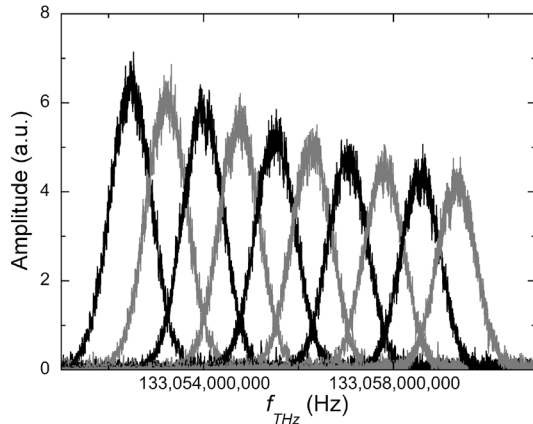


図5 CW-THz波の周波数走査

## 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3件）

- ① M. Jewariya, E. Abraham, T. Kitaguchi, Y. Ohgi, M. Minami, T. Araki, and T. Yasui, "Fast three-dimensional terahertz computed tomography using real-time line projection of intense terahertz pulse," *Opt. Express*, 査読

有, Vol. 21, Issue 2, pp. 2423-2433 (2013).

DOI: 10.1364/OE.21.002423

- ② T. Yasui, M. Jewariya, T. Yasuda, M. Schirmer, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time two-dimensional spatio-temporal terahertz imaging based on non-collinear free-space electro-optic sampling and application to functional terahertz imaging of moving object," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 査読有, Vol. 19, Issue 1, art. 8600110 (2013).

DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2210393

- ③ T. Yasui, K. Kawamoto, Y.-D. Hsieh, Y. Sakaguchi, M. Jewariya, H. Inaba, K. Minoshima, F. Hindle, and T. Araki, "Enhancement of spectral resolution and accuracy in asynchronous-optical-sampling terahertz time-domain spectroscopy for low-pressure gas-phase analysis," *Opt. Express*, 査読有, Vol. 20, Iss. 14, pp. 15071-15078 (2012).

DOI: 10.1364/OE.20.015071

〔学会発表〕（計7件）

- ① M. Jewariya, Y. Ohgi, E. Abraham, T. Araki, and T. Yasui, "Three-dimensional terahertz computed tomography based on real-time line projection of terahertz beam," International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2012), 2012.11.29, 東大寺総合文化センター（奈良市）.

- ② M. Jewariya, Y. Ohgi, E. Abhram, T. Araki, T. Yasui, "hree-dimensional imaging of internal structure using line-field terahertz computed tomography", 第72回応用物理学会学術講演会, 2012.9.13, 愛媛大学（松山市）.

- ③ M. Jewariya, K. Kawamoto, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui, "Evaluation of spectral resolution and accuracy in asynchronous-optical-sampling THz time-domain-spectroscopy", THz Science and Technology ~The Castle Meeting ~, 2011/11/29, Schloss Rauschholzhausen（ドイツ・マルブルグ）.

- ④ M. Jewariya, K. Kawamoto, Y. Iyonaga,

Yi-Da Hsieh, M. Nose, T. Yasui, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, "Optical-fiber-based, asynchronous optical sampling THz-TDS~Application for low-pressure gas spectroscopy~", Optics & Photonics Japan 2011, 2011.11.29, 大阪大学 (吹田市)

- ⑤ M. Jewariya, T. Yasui, and T. Araki, "THz frequency metrology based on Frequency Comb", 第2回先端フォトニクスシンポジウム, 2011.10.7, 日本学術会議講堂 (東京都) .
- ⑥ 河本亘司, ムケシュ・ジェワリヤ, 坂口良幸, 安井武史, 稲場 肇, 美濃島薫, 荒木 勉, "光ファイバーベース非同期光サンプリング式THz時間領域分光法 (V) ~低圧ガス分光への応用~", 第72回応用物理学学会学術講演会, 2011.9.1, 山形大学 (山形市) .

[その他]

ホームページ等

<http://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

ジェワリヤ ムケシュ (JEWARIYA MUKESH)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・助教  
研究者番号: 20608773

### (2) 研究分担者

該当無し

### (3) 連携研究者

該当無し

