

ギャップレス THz コムを用いた低圧ガス分光

(徳島大工^a, 阪大基礎工^b, 日本マイクロ光器^c, 電通大情報理工^d, 産総研計測標準^e)
 ○安井武史^{a,b}, 謝宜達^b, 坂口良幸^b, 横山修子^{b,c}, 美濃島薫^d, 稲場肇^e, 荒木勉^b

Low-pressure molecular gas spectroscopy using gapless THz-comb spectroscopy
 (Univ. Tokushima^a, Osaka Univ.^b, Micro Optics Co.^c, Univ. Electro-Communications^d, AIST^e)
 T. Yasui^{a,b}, Y.-D. Hsieh^b, Y. Sakaguchi^b, S. Yokoyama^{b,c}, K. Minoshima^d, H. Inaba^e, T. Araki^b
 e-mail: yasui.takeshi@tokushima-u.ac.jp <http://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

By tuning the laser mode-locked frequency to sweep THz-comb modes at intervals of their linewidth, we filled the frequency gaps between THz comb modes. The resulting gapless THz comb enhanced the spectral resolution down to the linewidth of THz comb mode.

1. はじめに

近赤外フェムト秒パルスレーザー光を光伝導アンテナ (PCA) や非線形光学結晶に照射すると、モード同期周波数の逆수에等しい周期のモード同期 THz パルス列 (THz 領域: 周波数 0.1 ~ 10THz、波長 30 μ m ~ 3000 μ m) が時間領域で発生する。このようなモード同期 THz パルス列は、フーリエ変換の関係にある周波数領域では、非常に安定した多数の周波数モード列がモード同期周波数間隔で櫛の歯 (コム) 状に立ち並んだスペクトル構造を示す。このようなスペクトル構造を THz コムと呼ぶ [1, 2]。THz コムは、多数の CW-THz 波の集合体と見なすことが出来るので、THz パルスの広帯域スペクトル特性と CW-THz 波の狭スペクトル線幅を併せ持つ。さらに、レーザー制御により、THz コムを構成する各周波数モードの絶対周波数をマイクロ波周波数標準に位相同期できる。したがって、この THz コムを THz 分光計測における周波数目盛りとして利用できると、『高確度』『高分解能』『広帯域スペクトル』を同時に実現可能と考えられる。しかし、その超離散マルチ・スペクトル構造のため、THz コムをそのまま THz 分光に応用しても、実用的なスペクトル分解能はコム・モード間隔であるモード同期周波数に制限される。本講演では、モード同期周波数走査によって THz コムをギャップレス化し、その有用性を THz ガス分光で評価した結果を紹介する。

2. 測定原理

非同期光サンプリング式 THz 時間領域分光法 (ASOPS-THz-TDS) [3-5] によって THz パルス列の電場時間波形を取得し、それをフーリエ変換することによって取得された THz コムのスペクトルは、レーザー・モード同期周波数に等しいコム・モード間隔と、測定時間窓の逆수에等しいコム・モード線幅を有している。通常、コム・モード線幅はコム・モード間隔よりも十分に狭いので、このコム・モード線幅を THz 分光計測に利用できると、THz 分光の更なる高分解能化が期待できる。そのためには、THz コム・モードの間隙部分を補完するように、THz コム・モードを横ずらしする必要がある (図 1)。THz コム・モードの周波数走査はレーザー・モード同期周波数を変化させることにより可能であるので、THz コム・モードをモード線幅間隔で逐次走査しながら THz スペクトルを取得し、それらを最終的に重ねることにより、間隙部分の無い超微細 THz スペクトル (ギャップレス THz コム) を得ることが可能になる。この手法は、狭線幅シングル・モード CW-THz 波を広帯域かつ連続チューニングするのと等価であると考えられるので、スペクトル分解能はコム・モード線幅に等しくなる。

3. 実験装置

ASOPS-THz-TDS の装置構成を図 2 に示す。デュアル・フェムト秒ファイバーレーザー (平均パワー 500mW、中心波長 1550nm、パルス幅 50fs) のモード同期周波数をルビジウム原子時計に位相同期することにより、モード同期周波数がわずかに異なるように制御する ($f_1 = 250,000,000\text{Hz}$, $f_2 = 250,000,050\text{Hz}$, $\Delta f = f_2 - f_1 = 50\text{Hz}$)。両レーザー光を非線形光学結晶で波長変換した後、THz 発生及び検出用の光伝導アンテナ (PCA) を用いて THz-TDS 光学系を構築した。ここで、THz パルスとプローブ光のパルス周期はわずかに異なるので、両者が THz 検出用 PCA で重なるタイミングがパルス毎に自動的にずれていき、高速サンプリングされる。その結果、サブピコ秒オーダーの THz パルス電場時間波形の時間スケールを、任意の時間スケール拡大率 [= $f_1/\Delta f$] で拡大できる。時間スケールが RF 領域まで拡大された電流信号が THz 検出用 PCA から出力されるので、電流-電圧変換後、その時間波形を高速デジタルで取得した。取得された THz パルス列の電場時間波形をフーリエ変換することにより、THz コムの振幅スペクトルを取得した。

4. 実験結果

THz 領域は、構成原子数の少ない気体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るが、THz 領域にひしめきあうように存在している様々な気体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確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ている。ここでは、低圧状態の水蒸気をサンプルに用いて、ガス分析における本手法の有用性を評価した。水蒸気と窒素の混合ガスを、ガスセル（長さ 500mm、直径 40mm）に封入し、水蒸気分圧を 10Pa に設定した。図 3(a)は、THz コム・モードを走査しない場合の 0.557THz 付近の吸収スペクトル（回転遷移 $1_{10} \rightarrow 1_{01}$ ）を示している。比較のため、この吸収線の NASA データベース値も併せて示している [6]。250MHz 間隔で等間隔に分布している THz コム・モードのみでは、0.557THz 付近の吸収線のスペクトル波形が詳細に再現できていない。次に、上述と同じ条件で、モード線幅（25MHz）刻みで THz コム・モードの周波数走査を行った結果を図 3(b)に示す。吸収線のスペクトル波形が詳細に再現できている様子が確認できる。観測された吸収線の線幅は 23MHz であり、ガス圧から予測される圧力拡がり線幅の 24MHz と良く一致している。また、吸収スペクトルの中心周波数（0.55693THz）は、文献値（0.556936THz） [6] と 10^{-5} の確度で一致している。

5. まとめ

ルビジウム原子時計に位相同期したギャップレス THz コムを生成し、低圧ガス分光に応用した。低圧水蒸気を用いた THz 分光実験より、THz コム・モードの線幅に等しいスペクトル分解能が実現可能であることを確認した。このようなギャップレス THz コムを THz 分光計測における周波数目盛りとして利用することにより、『高精度』『高分解能』『広帯域スペクトル』を併せ持つ THz 分光計測が実現できると期待される。

本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業【産学共創基礎基盤研究プログラム】の支援によって行われた。

参考文献

- [1] T. Yasui et al., Appl. Phys. Lett. **88**, 241104 (2006).
- [2] T. Yasui et al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. **17**, 191-201 (2011).
- [3] T. Yasui et al., Appl. Phys. Lett. **87**, 061101 (2005).
- [4] T. Yasui et al., Opt. Lett. **35**, 1689-1691 (2010).
- [5] T. Yasui et al., Opt. Express **20**, 15071-15078 (2012).
- [6] <http://spec.jpl.nasa.gov/>

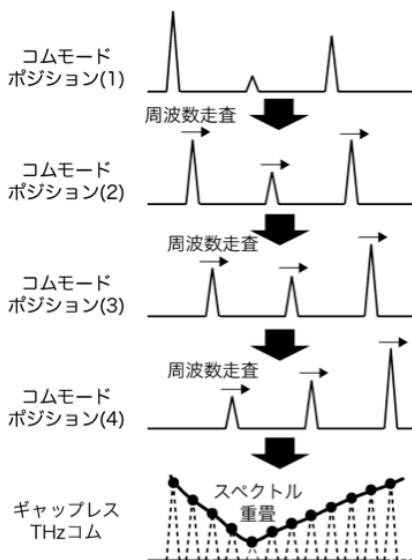


図 1 測定原理

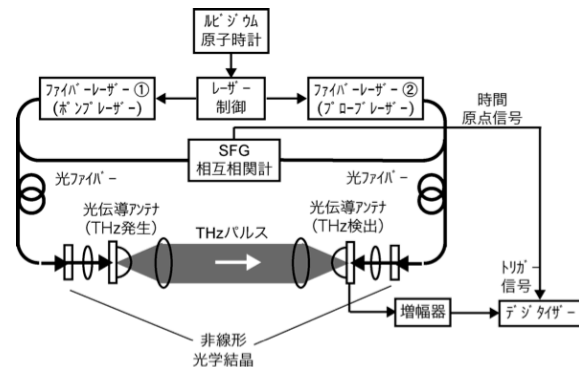


図 2 実験装置

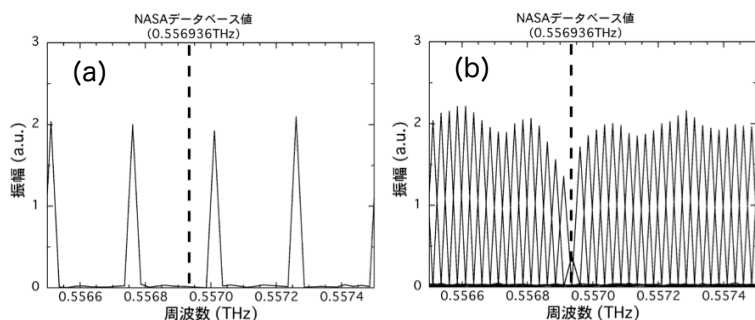


図 3 実験結果