

超精密テラヘルツ・シンセサイザー開発に関する 国際研究プロジェクト

安井 武史^{1*}, 岩田 哲郎¹, 森田 健²

International Research Project on Precise Terahertz Synthesizer

by

Takeshi YASUI, Tetsuo IWATA, Ken MORITA

We constructed a widely and continuously tunable terahertz frequency synthesizer traceable to a microwave frequency standard. Photomixing of two optical frequency synthesizers, linked to the frequency standard via dual optical frequency combs, make this THz synthesizer traceable to the frequency standard. To demonstrate the potential of wide and continuous tunability in the THz synthesizer, we tuned its output frequency by 100 GHz continuously around 0.65 THz by using a uni-traveling-carrier photodiode as a photomixer and applied it for precise THz spectroscopy of low-pressure molecular gas. This THz synthesizer will be a powerful tool for broadband, high-precision THz spectroscopy.

Key words: terahertz, optical comb, synthesizer, spectroscopy

1. はじめに

テラヘルツ波 (THz 波: 周波数 0.1~10THz、波長: 30~3000 μ m) は、光波と電波の周波数境界に位置する電磁波である。これまでは、良質なレーザー光源や高感度検出器の開発が遅れていたため、ほとんど研究が行われていない未開拓電磁波領域であった。しかし、近年の安定なレーザー技術や超高速光デバイス技術の発達により、THz 波が比較的容易に生成・検出できるようになり、この領域の

研究開発が加速している。THz 波は、電波と光波の境界に位置することから、その両者の性質を有するユニークな電磁波である。具体的には自由空間伝搬、非金属物質に対する良好な物質透過特性、非侵襲性・安心安全、コヒーレントビーム、超短パルス、広帯域スペクトル、低散乱性、イメージング測定や分光測定が可能、といった特徴を有する。

THz 波を用いた代表的な応用計測として、ガス分析が挙げられる。THz 領域は、構成原子数の少ない分子の特徴的な吸収スペクトル (THz 指紋スペクトル) が現れる周波数帯であり、大気中の様々な極性気体分子の回転遷移スペクトルがこの領域に数多く存在している。更に、THz 波の波長は、エアロゾルのような微粒子の直径と比べると十分に長いので、これらによる散乱の影響を受け難い。したがって、可視光や赤外光では散乱により分析困難なエアロゾル混在ガスサンプルでも容易に分析できると期待さ

1 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
Institute of Technology and Science,
The University of Tokushima

2 徳島大学フロンティア研究センター
Center for Frontier Research of Engineering,
The University of Tokushima

*連絡先:

〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部

れている。精密ガス分析のためには、任意周波数の狭線幅 CW-THz 波を高安定・高確度・広帯域に発生可能な THz シンセサイザーが求められている。

無線通信分野においても THz 波は注目されている。無線通信の変遷に目を向けると、情報量の増大と共に利用無線電波の高周波化が進められてきている。例えば、無線通信が始まった当初は数百 kHz～数十 MHz の電波が使われていたが、現在の無線 LAN では 2～5GHz 帯のミリ波が広く使われている。近年、ハイビジョンや 3D シネマの普及とそれに伴う情報量の急速な増大は、無線周波数の更なる高周波化を加速させており未開拓無線領域である THz 帯の利用が検討されている。無線通信では、混信を避けるため、各種応用毎に利用周波数の割り当てが厳密に決められているが、THz 帯においても周波数割り当てに向けた準備が進められている。与えられた周波数帯を効率的に THz 無線通信で利用するためには、任意周波数のキャリア波を高安定・高確度に発生可能な THz シンセサイザーが重要である。

THz シンセサイザーを実現するためのアプローチとして、2つの手法がある。光学的手法であるフォトミキシング法では、光周波数差が THz オーダーの 2 台の CW 近赤外レーザー (CW-NIR レーザー) 光を干渉させることにより THz オーダーの光ビートを発生させ、その包絡波成分をフォトミキサーで自由空間に取り出す。この手法により、広帯域な周波数チューニングが可能であるが、通常は光周波数制御を行わないフリーランニング CW-NIR レーザーを用いるため、得られる CW-THz 波の周波数確度や安定性は十分とは言えなかった。一方、電気的手法では、周波数は市販のマイクロ波周波数シンセサイザーと周波数通倍器を組み合わせることで、1THz 程度までの周波数を発生可能である。この手法では、周波数標準器からの基準信号を周波数シンセサイザーに入力することにより、周波数の絶対値が精密に確定した信号を発生させることができ、線幅が狭く高安定という特徴を有する。しかし、周波数通倍器の動作周波数帯域は出力周波数の 10～20%程度であり、広帯域にわたる連続チューニングは不可能である。

上述の 2つの手法の中で『広帯域連続チューニング』『狭線幅』『高確度』な THz シンセサイザーを実現するための有力な手法はフォトミキシングであると考えられる。これは、フォトミキシングに用いる CW-NIR レーザーの周波

数安定化制御を行うことにより、狭線幅と高確度を付与できるからである。通常、CW-NIR レーザーの周波数安定化制御では、原子や分子の吸収線が用いられてきたが、これらの吸収線は離散的に分布しているため、広帯域連続チューニングには適さない。近年、CW-NIR レーザーの周波数安定化制御の新しい周波数リファレンスとして光コムが注目されている。光コム(フェムト秒レーザー光)は、時間領域において非常に安定した高繰り返しモード同期超短パルス列を示す一方で、フーリエ変換の関係にある光周波数領域では多数の光周波数モード列(コム・モード)が櫛の歯(Comb)状でモード同期周波数間隔に立ち並んだ離散スペクトル構造をとる。光コムは、位相が同期した多数の CW レーザー光の集まりと見なすことができ、広い周波数選択性・高いスペクトル純度・周波数通倍機能・単純性といった特徴を有している。更に、レーザー制御を用いて、コム間隔およびキャリア・エンベロープ・オフセット周波数をマイクロ波周波数標準に位相同期することにより、全てのコム・モードの絶対周波数を値付けでき、周波数標準にトレーサブルな『光周波数の物差し』として利用できる。このような特性は、フォトミキシングに用いる CW-NIR レーザーの周波数安定化制御に最適な周波数リファレンスであると考えられる。これまでに、同一の光コムの異なるコム・モードに、2 台の CW-NIR レーザーを位相同期した後、フォトミキシングすることにより、マイクロ波周波数標準にトレーサブルな CW-THz 波の発生(周波数～1.2THz、線幅 150kHz)が報告されている。更に、CW-NIR レーザーの位相同期を保った状態でコム間隔を変化させることにより、CW-THz 波の連続チューニングが実現されているが、そのチューニング範囲は 11MHz に留まっている。これは、光コムに対して位相同期された 2 台の CW-NIR レーザーの光周波数が、お互い同様な変化を示し、実際の光周波数変化の大部分が相殺されるためである。

本研究では、2 台の CW-NIR レーザーを異なる光コムに位相同期させた光シンセサイザーを 2 台構築し(デュアル光シンセ)、この出力光を単一走行キャリア・フォトダイオード(UTC-PD)でフォトミキシングすることにより、高安定で狭線幅な CW-THz 特性を保ちつつ、連続チューニング範囲を大幅に拡大することを試みた。更に、低圧ガス分光への応用を行った。

2. 原理

まず、図 1(a)に示すように、2 台の CW レーザー光を 1 台の光コム (コム間隔 f_{rep} 、キャリア・エンベロープ・オフセット周波数 f_{ceo}) の異なるモード (m_1, m_2) に位相同期し、フォトミキシングによって CW-THz 波を発生する場合を考える。それぞれの CW レーザー光の光周波数 (f_{opt1}, f_{opt2}) は、以下のように表せる。

$$f_{opt1} = f_{ceo} + m_1 f_{rep} + f_{beat1} \quad (1)$$

$$f_{opt2} = f_{ceo} + m_2 f_{rep} + f_{beat2} \quad (2)$$

ここで、 f_{beat1} および f_{beat2} は、コムモードと CW レーザー光のビート周波数である。このようにして、光コムに位相同期した 2 台の CW レーザー光をフォトミキシングすることによって発生させた CW-THz 波の周波数 f_{THz} は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} f_{THz} &= f_{opt2} - f_{opt1} = (m_2 - m_1) f_{rep} - (f_{beat2} - f_{beat1}) \\ &= \Delta m \cdot f_{rep} - (f_{beat2} - f_{beat1}) \end{aligned} \quad (3)$$

この手法では、フォトミキシングの過程で f_{ceo} が相殺されるので、 f_{ceo} の制御は不要となる。 f_{THz} を連続チューニングする場合、位相同期を保ちながら m_1 や m_2 をスイッチするのは容易でないので、2 台の CW レーザーの位相同期を保った状態で f_{rep} を変化させた方が現実的である。この場合のチューニングレンジ Δf_{THz} は、以下の式で表せる。

$$\Delta f_{THz} = \Delta m \cdot \Delta f_{rep} \quad (4)$$

ここで、 Δf_{rep} は f_{rep} の最大可変範囲であり、通常は f_{rep} のたかだか 1% 程度である。例えば $f_{rep} = 100$ MHz で $f_{THz} = 1$ THz の場合、 $\Delta m = 10,000$ および $\Delta f_{rep} = 1$ MHz となるので、 Δf_{THz} は 10GHz に留まる。これは、 f_{rep} の変化によりアコーディオンのように変化する光コムに対して位相同期された 2 台の CW レーザー光の光周波数は、お互い共通な変化を示し、実際の光周波数変化の大部分が相殺されるためである。

このような連続チューニング範囲の制限を解消するため、2 台の光コムに対して 2 台の CW レーザー光を位相同期することにより、2 台の独立した光シンセサイザーを構築し、これをフォトミキシングすることにより CW-THz 波を発生させる手法を本研究では用いる [図 1(b)]。この場合の 2 台の光シンセサイザーの光周波数は以下の式で与えられる。

$$f_{opt1} = f_{ceo1} + m_1 f_{rep1} + f_{beat1} \quad (5)$$

$$f_{opt2} = f_{ceo2} + m_2 f_{rep2} + f_{beat2} \quad (6)$$

この場合の CW-THz 波の絶対周波数 f_{THz} は、以下のように

表せる。

$$\begin{aligned} f_{THz} &= f_{opt2} - f_{opt1} \\ &= (f_{ceo2} + m_2 f_{rep2} + f_{beat2}) - (f_{ceo1} + m_1 f_{rep1} + f_{beat1}) \end{aligned} \quad (7)$$

一方、 f_{opt1} を固定し、 f_{opt2} を可変させて CW-THz 波を発生させる場合の連続チューニング範囲は、以下のように表せる。

$$\Delta f_{THz} = m_2 \cdot \Delta f_{rep} \quad (8)$$

通常、 m_2 は Δm より 2 桁以上大きい値を取る所以、 Δf_{THz} は 1THz 以上に達し、広帯域 THz シンセサイザーが実現できる。

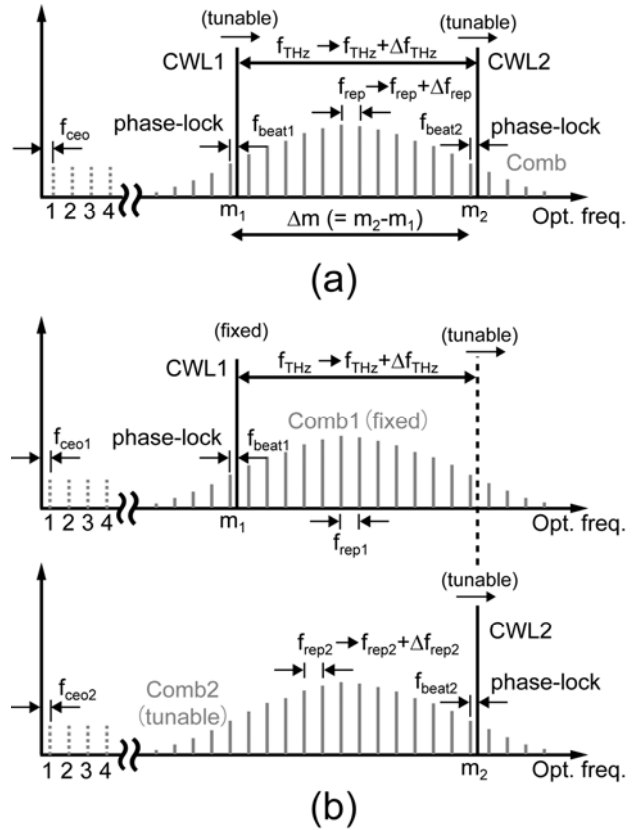


Fig. 1. THz frequency synthesizer based on (a) single optical comb and (b) dual optical combs.

3. 実験装置

実験装置を図 2 に示す。1.5 μ m 帯の 2 台の CW レーザー (CWL1、CWL2) をフォトミキシングさせて CW-THz 波を発生させる。独立した 2 つの光コム (Comb1, $f_{ceo1}=30$ MHz, $f_{rep1}=250$ MHz ; Comb2, $f_{ceo2}=30$ MHz, $f_{rep2}=250$ MHz) は、レーザー制御装置によって、ルビジウム周波数標準に位相同期させている。更に、CWL1 と CWL2 は、Comb1 と Comb2 に、それぞれ位相同期している。その結果、CWL1 と CWL2 の光周波数を、ルビジウム周波数標準に基づいて、決定で

きる。CWL1 の出力光は偏波コントローラーを通過させ、分岐カプラ (50 : 50) によって CWL2 の出力光と干渉させる。このとき、干渉光が最大となるよう偏波コントローラーを操作する。その後、分岐カプラ (95 : 5) によって THz 発生用ポートと次数を決定するため波長計用ポートに 2 分岐される。THz 発生用ポートの出力光はエルビウム添加ファイバー増幅器 (EDFA) によって必要な光出力まで増幅する。その後、広帯域 UTC-PD (NTT Electronics、応答周波数=0.2~1.8THz) によってフォトミキシングされて、その差周波成分が出力される。UTC-PD からの出力周波数をチューニングさせるために、CWL1 の光周波数を固定した状態で、CWL2 の光周波数を走査する。Comb2 のコム間隔 (f_{rep2}) を変化させることにより、CWL2 の発振周波数を変化させる。発生した CW-THz 波はガス分光計測に応用するため、低圧ガスセルを透過させパイロ検出器でロックイン検出を行う。

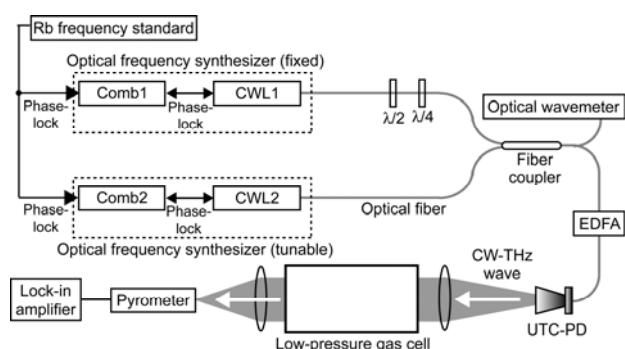


Fig. 2. Experimental setup.

4. 実験結果

まず、2 台の光シンセサイザーの光周波数差を可能な限り近づけ、両者の光ビート信号を高速光検出器 (応答周波数 1.2GHz) で電気信号に変換し、RF スペクトラム・アナライザー (RBW=10kHz) で測定した。測定されたビート信号スペクトルを図 3 に示す。ローレンツ関数でカーブ・フィッティングを行ったところ、スペクトル半値全幅は 520kHz となった。2 台の光シンセサイザーは、それぞれ 492kHz と 196kHz のスペクトル半値全幅を有しているので、この値は妥当である。実際の CW-THz 波発生では、THz オーダーの光ビート信号を UTC-PD でフォトミキシングして包絡波成分を取り出すが、得られるスペクトル半値全幅は、この RF ビート信号のスペクトル半値全幅と同じになる。すなわち、開発した THz シンセサイザー

によって 520kHz のスペクトル分解能が達成可能である。

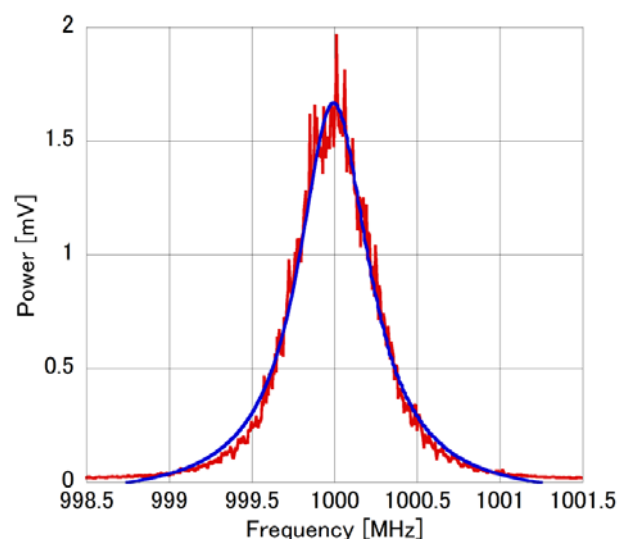


Fig. 3. RF spectrum of optical beat signal between two optical frequency synthesizers.

開発した THz シンセサイザーのガス分析手段としての有用性を評価するため、アセトニトリル (CH_3CN) ガスの THz 分光を行った。星間物質のひとつであるアセトニトリルは、宇宙天文学の分野において宇宙の物理状態を知るための重要なプローブである一方で、揮発性有機化合物 (VOC) ガスでもあるため大気環境分析でも重要と考えられている。アセトニトリルは対称コマ型分子であり、回転遷移による吸収線の周波数 ν は以下の式で表される。

$$\nu = 2B(J+1) - 4D_J(J+1)^3 - 2D_{JK}(J+1)K^2 \quad (9)$$

ここで、 B は対称軸周りの回転定数、 D_J と D_{JK} は分子回転による遠心力ひずみ定数、 J は全角運動量回転量子数、 K : 分子対称軸方向回転量子数である。上式は、 D_J と D_{JK} に起因する微細スペクトル構造を有する吸収線群が、周波数 $2B$ ($=18.4\text{GHz}$) 間隔で現れることを意味する。従来の THz 分光装置では、 $2B$ 間隔で現れる吸収線群と各吸収線群内の微細スペクトル構造を同時に観測することは困難であったが、本研究で開発した THz シンセサイザーの広い周波数ダイナミックレンジ特性を用いると、同時観測が可能と考えられる。

実験では、アセトニトリルガスの微細構造が圧力拡がりによって重畳してしまうことを避けるため、アセトニトリルガスを低圧ガスセルに封入し、圧力状態を 20Pa に保つ

た状態で分光計測を行った。まず、周期的な吸収線群を観測するため、600~700GHz の周波数範囲をワイドチューニング（周波数ステップ=5MHz, ステップ数=20000 回）しながら分光計測した。図4は測定結果を示しており、 $J=32\sim 37$ の6本の吸収線群が、18.4GHz 間隔で周期的に観測されている様子が確認できる。

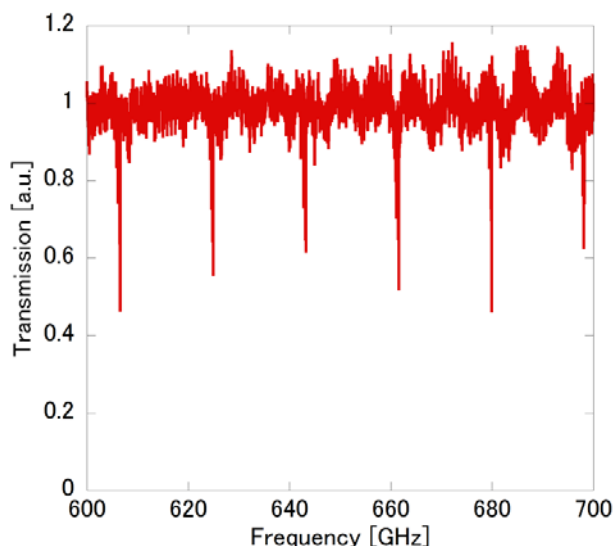


Fig. 4. Transmission spectrum of six manifolds ($J=32\sim 37$) in acetonitrile gas.

次に、 $J=33$ 吸収線群内部の微細スペクトル構造を確認するため、624.75~624.95GHz をファインチューニング（周波数ステップ=31kHz, ステップ数=6666 回）しながら分光計測した。図5は測定結果を示しており、4本の吸収線が確認できる ($J=33, K=0\sim 3$)。ローレンツ関数を用いたカーブフィッティングにより求めた中心周波数と JPL スペクトル・データベースの比較したところ、周波数偏差は $-0.14\pm 0.3\text{MHz}$ (平均値±標準偏差) となった。これらの測定結果から、スペクトル精度 10^{-7} で THz 分光計測が可能であることが分かった。

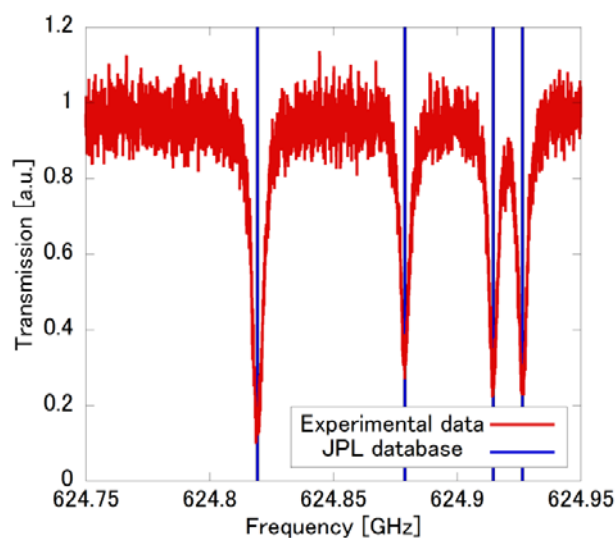


Fig. 5. Transmission spectrum of hyperfine structured absorption lines ($J=33, K=0\sim 3$) in acetonitrile gas.

5. まとめ

本研究では、有力な THz 応用として期待されるガス分析や高速・大容量無線通信に利用可能な精密 THz シンセサイザーの開発を行った。デュアル光コムを基準としたデュアル光シンセサイザーをフォトミキシングすることにより、『広帯域連続チューニング』『狭線幅』『高精度』という特徴を併せ持つ THz シンセサイザーが可能になった。達成されたスペクトル分解能は 520kHz で、スペクトル精度は 10^{-7} であった。連続チューニング範囲は、100GHz で、これは従来のシングル光コムを基準とした THz シンセサイザーよりも大幅に増大している。最後に、ガス分析の応用例として、アセトニトリルガスを分析したところ、これまで困難とされた吸収線群の周期分布と吸収線群内の微細スペクトル構造を同時計測することに成功した。

今後は、連続チューニング範囲を 1THz 以上まで拡大し、各種気体分子の混合ガスサンプルの計測を行う予定である。