

デュアル光周波数コム参照型広帯域連続可変 CW-THz 波発生

M2 木村 洸仁

1. 研究背景および目的

テラヘルツ波 (THz 波 : 周波数 0.1~10THz, 波長 : 30 μ m~3mm) は, 光波と電波の周波数境界に位置し, 光波と電波の特徴を併せ持つユニークな電磁波として注目されている. 近年, 大容量無線通信や高機能センシングといった産業分野での利用が具体化し始め, THz 波に関連した計量標準 (周波数, パワー等) の整備が世界的に急がれている. 現在, 可視~近赤外領域において, 実験手法の手軽さ, 安価な光源といった点より, 波長掃引レーザーを用いた吸収分光が精力的に行われている. 特に, THz 帯には気体分子の回転によるエネルギー遷移が無数に存在するが, THz 帯において有効な波長掃引光源がないため, 精密 THz シンセサイザーが強く望まれている.

現在, CW-THz 光源として, 2 台の CW 近赤外レーザー光のフォトミキシングにより差周波に相当する波長可変 CW-THz 光源が実現されているが, 光周波数の制御を行わないフリーランニング・レーザーを用いていたため, 発生させた CW-THz 波の周波数確度や安定性は十分とは言えなかった[1]. 固体発振器では, Gunn 効果による Gunn ダイオードと逡倍器を組み合わせることにより, 1THz 付近までの THz 発生が報告されている. しかし, 逡倍器と組み合わせるため出力が弱くなる. 高出力な THz 発生として, 非線形結晶内で起きるパラメトリック増幅を応用し, 入射する励起光と結晶軸のなす角度によって 1~3THz の周波数可変 THz 波を実現する THz パラメトリック発振器 (TPO) がある[2]. しかし, TPO は一般的なレーザーシステムよりも構造が複雑になり, LNiO₃ 結晶の角度・温度管理において, 繊細な制御が求められる. システムの簡便性という点において, 近年, 半導体量子井戸中に形成される量子準位 (サブバンド) 間の光学遷移を利用した半導体レーザー, THz 量子カスケードレーザー (THz-QCL) が登場している[3]. THz-QCL は半導体レーザーの利点を兼ね備える優れたレーザーであるが, 低温での動作しか実現されておらず, 大きな周波数変化も行うことが出来ない. そこで, 我々が注目したのがフォトミキシングと光コムを融合した THz シンセサイザーである. 本研究報告では, 精密 THz シンセサイザーの根幹をなす技術である光コムの安定化について報告する.

2. 従来技術及び原理

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, 時間領域においてモード同期周波数 (f_{rep}) で規則的に繰り返される超短光パルス列を示す一方で, それとフーリエ変換の関係にある周波数領域においては, 多数の光周波数モード列 (コム・モード) がモード同期周波数 (f_{rep}) の間隔で櫛の歯 (comb : コム) 状に立ち並んだ周波数コムのスペクトルを示す (図 1) [4]. モード間隔を f_{rep} とし, 周波数軸上でコムモードを光周波数領域から仮想的にゼロ周波数付近まで伸ばしていくと, 端数の周波数成分が存在する. この剰余周波数成分をキャリア・エンベロープ・オフセット周波数 (f_{CEO}) と呼ぶ. したがって, m 番目のコムモードの光周波数 $f(m)$ は下記のように表すことができる.

$$f(m) = f_{CEO} + mf_{rep}$$

したがって、 f_{CEO} と f_{rep} を原子時計に位相同期させた状態で、波長計を用いて m を決定すると、 f_m の値が一義的に決定できる。すなわち、光コムが「光周波数の物差し」として利用できる。更に、ここで波長可変 CW レーザーを光コムと同期させ、光コム間隔を可変することで、任意の光周波数を出力できる“光周波数シンセサイザー”となる（図 2）。

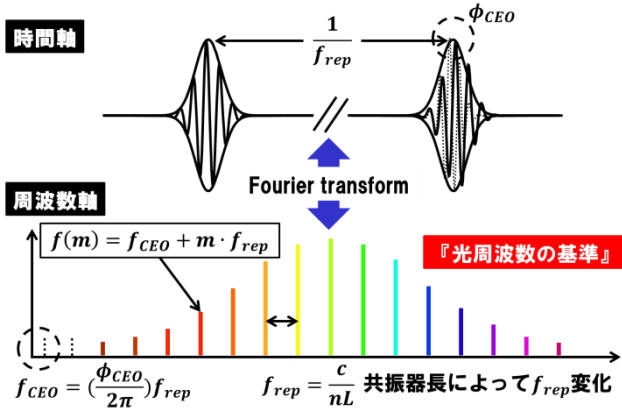


図 1 光周波数コムの概念

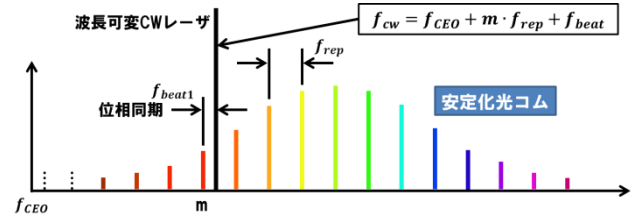


図 2 光周波数シンセサイザーの概念

ここで、もう一台の波長可変 CW レーザーを用意する。2 台の波長可変 CW レーザーの周波数差が THz 領域になるよう光コムの異なるモード (m_1 , m_2) と同期させる（図 3） [5]。それぞれの波長可変 CW レーザー光の光周波数 (f_{cw1} , f_{cw2}) は以下ようになる。

$$f_{cw1} = f_{CEO} + m_1 \cdot f_{rep} + f_{beat1}$$

$$f_{cw2} = f_{CEO} + m_2 \cdot f_{rep} + f_{beat2}$$

f_{beat1} , f_{beat2} は、光コムと波長可変 CW レーザーのビート周波数である。光コムに位相同期した 2 台の波長可変 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} は以下の式で表せる。

$$f_{THz} = f_{cw2} - f_{cw1} = (m_2 - m_1) \cdot f_{rep} + (f_{beat2} - f_{beat1})$$

この手法では、フォトミキシングの過程で f_{CEO} の揺らぎを打ち消すことが出来るため、 f_{CEO} の制御は必要ない。更に、光シンセサイザーと同様に f_{rep} を可変することにより、光コムと波長可変 CW レーザーの位相同期を保ちつつ f_{THz} を走査することができる。つまり f_{THz} を連続的に変化させることが出来る（図 4）。この場合の Δf_{THz} は以下の式より与えられる。

$$f_{cw1} = f_{CEO} + m_1 \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep}) + f_{beat1}$$

$$f_{cw2} = f_{CEO} + m_2 \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep}) + f_{beat2}$$

$$f_{THz} + \Delta f_{THz} = f_{cw2} - f_{cw1} = (m_2 - m_1) \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep}) + (f_{beat2} - f_{beat1})$$

$$\Delta f_{THz} = (m_2 - m_1) \cdot \Delta f_{rep}$$

ここで、 Δf_{rep} は f_{rep} の最大可変範囲であり、通常は f_{rep} の1%程度である。例えば $f_{rep}=100\text{MHz}$ で $f_{THz}=1\text{THz}$ の場合、 $m_2 - m_1=10000$ 及び $\Delta f_{rep}=1\text{MHz}$ となるので、 Δf_{THz} は 10GHz 程度となり、広帯域な連続可変とはいえない。これは同一の光コムに2台の波長可変CWレーザーを位相同期するため、お互い同様の变化をし、光周波数変化の大部分が相殺されるためである。

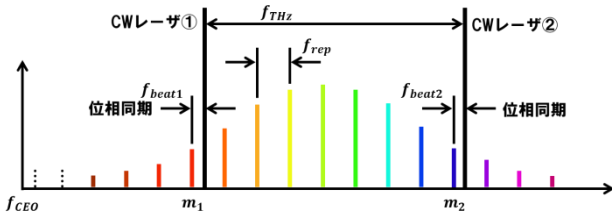


図3 シングル光コム参照型 THz シンセ

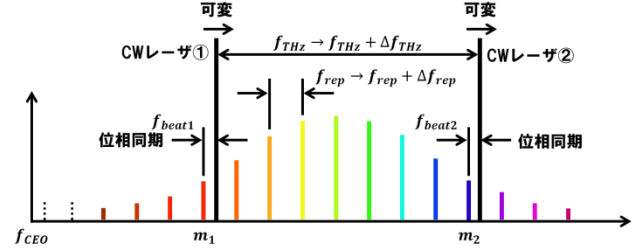


図4 シングル光コム参照型 THz シンセ連続可変

そこで、限定的な連続可変を解消するため、各波長可変CWレーザーを2台の光コムと独立して位相同期させる(図5)。

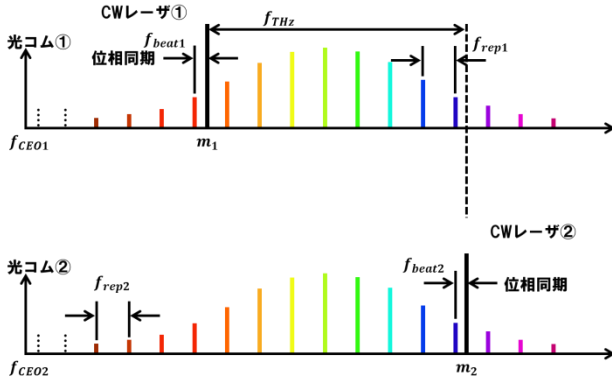


図5 デュアル光コム参照型 THz シンセ

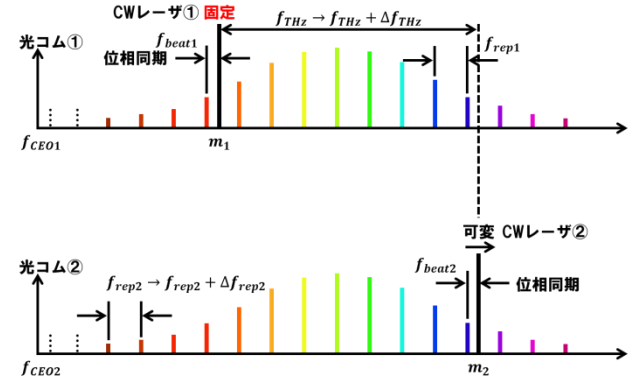


図6 デュアル光コム参照型 THz シンセ連続可変

この場合の2台の波長可変CWレーザーの光周波数とフォトミキシングにより発生させたCW-THz波(f_{THz})は次のようになる。

$$f_{cw1} = f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1}$$

$$f_{cw2} = f_{CEO2} + m_2 \cdot f_{rep2} + f_{beat2}$$

$$f_{THz} = f_{cw2} - f_{cw1} = (f_{CEO2} + m_2 \cdot f_{rep2} + f_{beat2}) - (f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1})$$

ここで、 f_{cw1} を固定し、 f_{cw2} の f_{rep2} だけ可変させてCW-THz波を発生させるときのそれぞれの変化は以下のように表せる。

$$f_{cw1} = f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1}$$

$$f_{cw2} = f_{CEO2} + m_2 \cdot (f_{rep2} + \Delta f_{rep2}) + f_{beat2}$$

$$f_{THz} + \Delta f_{THz} = \{f_{CEO2} + m_2 \cdot (f_{rep2} + \Delta f_{rep2}) + f_{beat2}\} - (f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1})$$

$$\Delta f_{THz} = \Delta f_{cw2} = m_2 \cdot \Delta f_{rep2}$$

となり、 $f_{rep} = 100\text{MHz}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の場合、通常 m_2 は7桁に達するため Δf_{THz} は1THz以上になる。よって広帯域連続可変 CW-THz 波源が実現できる (図 6)。

3. 光コム安定化制御

f_{rep} の制御は、レーザーの縦モード間隔がレーザーの共振器長に依存していることから共振器長を制御すれば良い。共振器中に PZT を挿入することにより、共振器長を制御する。 f_{CEO} の制御は、パルス列の位相速度および群速度の差に起因していることから、共振器内の屈折率に関わる励起レーザーの強度を制御することにより達成される。

f_{rep} は容易に観測可能であり安定化制御を実現している[6]。しかし、周波数軸上でコムモードを仮想的にゼロ周波数付近まで伸ばしたときの剰余成分である f_{CEO} を直接観測することは出来ない。そこで、 $f - 2f$ 干渉計による f_{CEO} 検出を行う (図 7)。

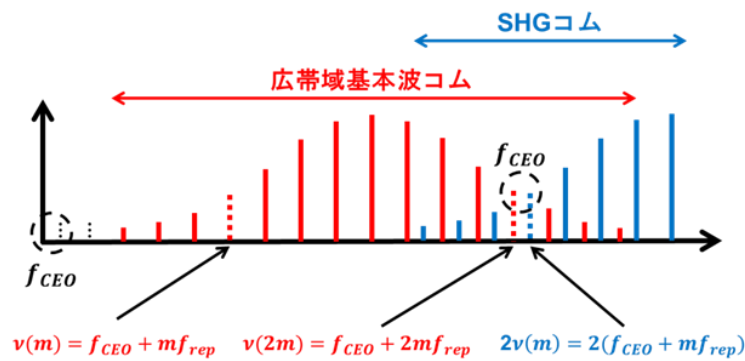


図 7 f_{CEO} 検出の概念

光コムを高非線形ファイバに入射することにより、スペクトル帯域が 1 オクターブ以上広がったスーパー・コンティニューム光 (SC 光) を発生させる。スペクトルが 1 オクターブ以上広がった SC 光には、 m 番目 (低周波端近傍) と $2m$ 番目 (高周波端近傍) のモードが含まれ、 $2m$ 番目のモードの光周波数 $f(2m)$ は、

$$f(2m) = f_{CEO} + 2mf_{rep}$$

となる。一方、 m 番目のモードを非線形光学結晶で波長変換すると、2倍波の光周波数 $2f(m)$ は

$$2f(m) = 2(f_{CEO} + mf_{rep})$$

となる。ここで、 $f(2m)$ と $2f(m)$ の光は同じ波長帯であるので、空間的に重ね合わせて干渉信号を取り出せる ($f - 2f$ 干渉計)。

$$2f(m) - f(2m) = f_{CEO}$$

となる。その結果、両者の差周波成分である f_{CEO} が、抽出できる。

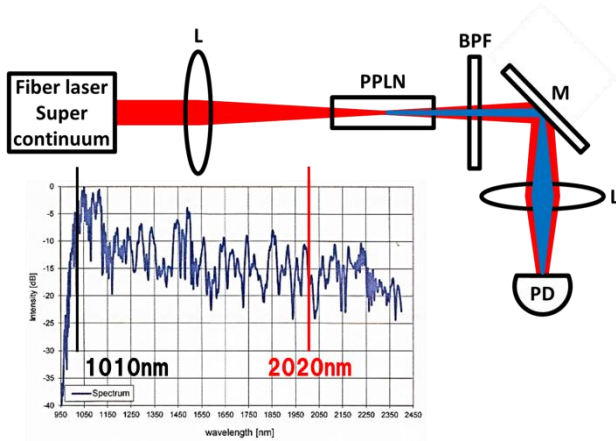


図 8 $f-2f$ 干渉計の構成と SC 光スペクトル

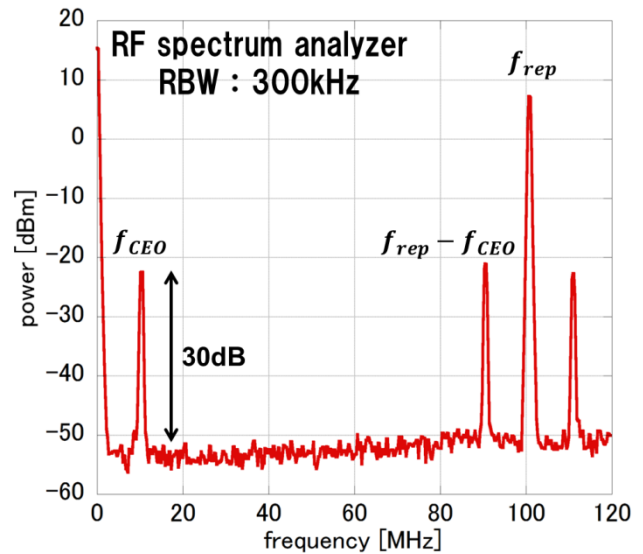


図 9 $f-2f$ 干渉計による f_{CEO} 信号

図 8 に $f-2f$ 干渉計の構成と SC 光スペクトルを示す。ファイバレーザー光と高非線形ファイバによって発生させた SC 光を、集光用レンズ ($f=200$) を用いて非線形光学結晶である PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate : PPLN) に入射させ、基本波 $2020\text{nm}[f(m)]$ に相当の SHG 光 $1010\text{nm}[2f(m)]$ に相当を発生させる。これと基本波 1010nm 成分 $[f(2m)]$ に相当を干渉させ、 1010nm バンドパスフィルタ (BPF) で干渉光のみを切り出す。受光用レンズ ($f=90$) を用いて、PD に入射し f_{CEO} 信号を検出した。図 8 の干渉計は、共通光路配置となっており、空気揺らぎや振動の影響を干渉信号が受けないため、安定に f_{CEO} を検出できる。

図 9 に f_{CEO} 信号を示す。PD で得た信号は RF スペアナで取り込み、RBW : 300kHz で計測した。 10MHz 付近に制御に必要な 30dB 以上の f_{CEO} 信号と 90MHz 付近にそのミラー信号が観測された。この f_{CEO} 信号が一定となるよう励起 LD の駆動電流に制御を与える。

図 10 に f_{CEO} 信号の位相同期システムを示す。図 9 より、BPF (Mini-Circuits 社 : BBP-10.7+) を用いて f_{CEO} 信号のみを抜き出す。次に、抜き出した信号をアンプ (NF 社 : DIFFERENTIAL AMPLIFIER DC-10MHz) し前と同様の BPF を通し、分周器 ($1/20$) を用いて制御可能帯域まで周波数を落とす。最後に、分周器後の信号とファンクションジェネレータ (Agilent 社 : 33522A) 540kHz をミキサ (Mini-Circuits 社 : ZAD-6+) を用いてミキシングする。エラーシグナルが 0 になるよう、PI 制御 (SRS 社 : SIM960 Analog PID Controller) を介して、オシレータの励起 LD の駆動電流に返している。

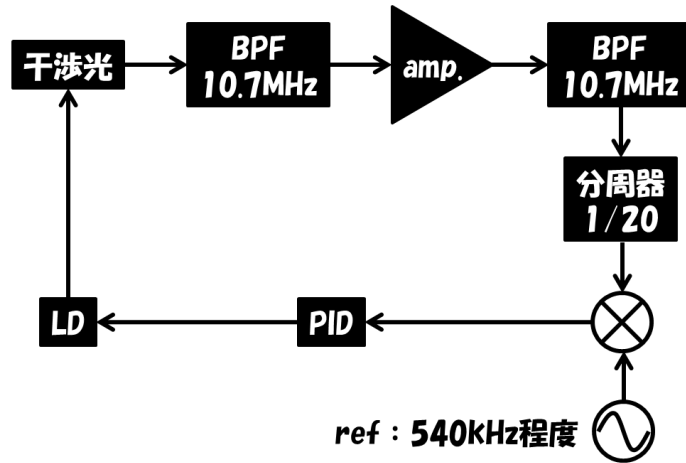


図 10 f_{CEO} 信号の位相同期システム

制御の妥当性を評価するため後段 BPF 後の信号を周波数カウンタ (Agilent 社 : 53132A) の標準偏差機能を用いて、制御有無の比較を行った (図 11). 励起 LD の駆動電流制御は PZT 等よりも速い制御が可能であり、ゲートタイムの短い時から変化が顕著に現れている. また、すでに f_{CEO} 信号の安定化を実現している大阪大学の市販光コムシステム (ファイバレーザ) との比較も行った (図 12). 市販品と同等以上の安定度が得られていることが分かる.

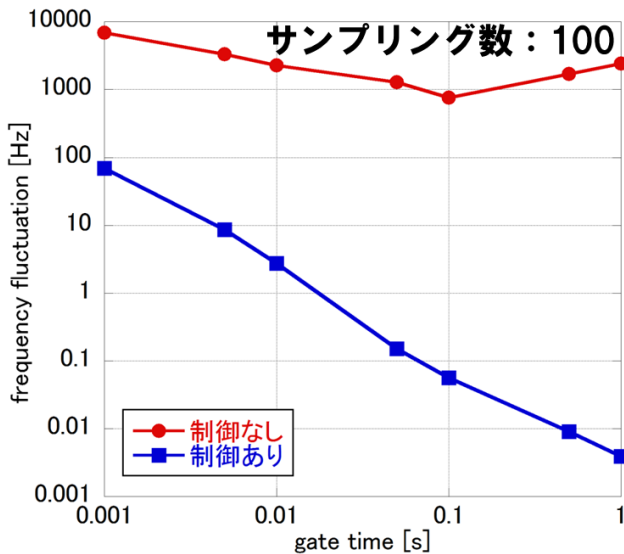


図 11 制御有無による周波数揺らぎ比較

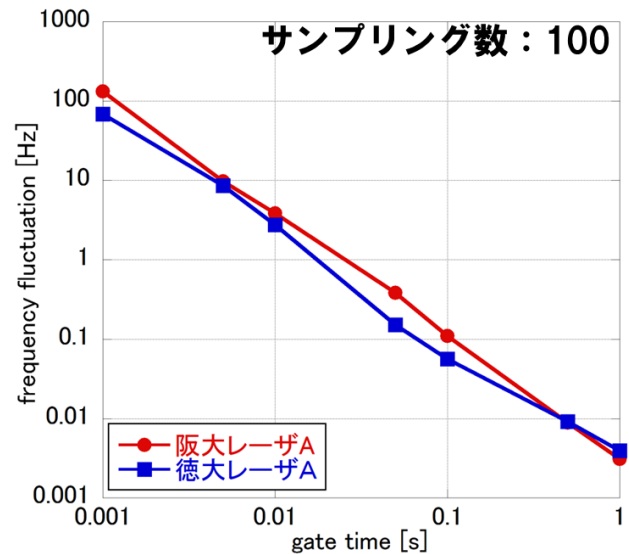


図 12 徳大・阪大制御時の周波数揺らぎ比較

以上より光コムを『光のものさし』として使うことが出来る.

4. デュアル光コムを基準とした THz シンセサイザ

デュアル光コムを基準とした THz シンセサイザを構築した (図 13). CW レーザ1 (中心波長 : 1550.8nm) と波長可変 CW レーザ2 (波長走査範囲 : 1500~1600nm) は PBS を用いて comb1 と comb2 (f_{rep} : 250MHz, 波長 : 1470~1650nm) に干渉させる. 波長板 ($\lambda/2$ 板, $\lambda/4$ 板) を用いて干渉効率を上げ, 後段の PBS によりグレーティングに最適な偏光である水平偏光成分のみを抜き出し, 検出器でビ

ート信号を観測する. PD①②で得られた信号を図 14 に示す.

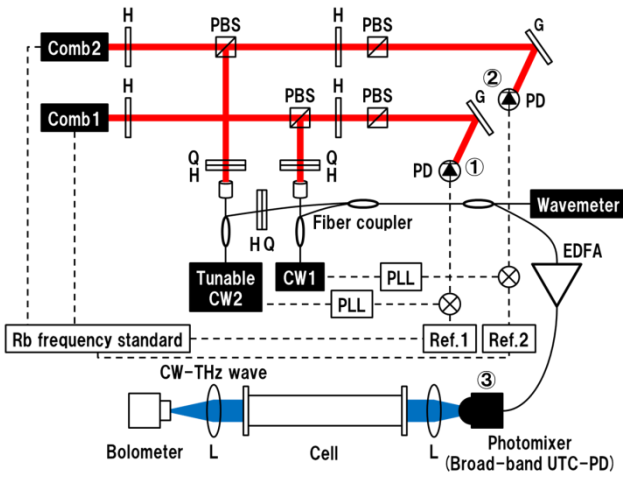


図 13 THz シンセサイザ実験系

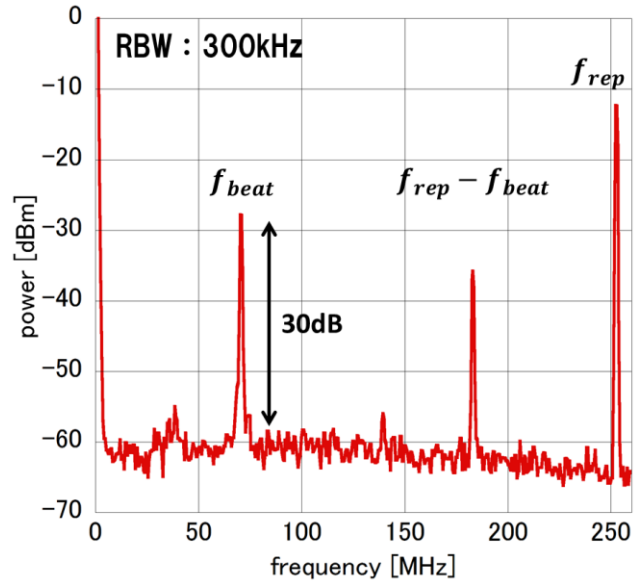


図 14 検出器①②で得られた信号

図 14 で得られた f_{beat} 信号を 30MHz になるよう駆動電流 (CW1, CW2) と PZT (CW2) にフィードバックし, 光コムと位相同期する. 光コムに位相同期したときの周波数揺らぎと線幅を図 15, 16 に示す. 図 16 より 30MHz にロックしていることが分かる, また, 線幅も 500kHz 以下である.

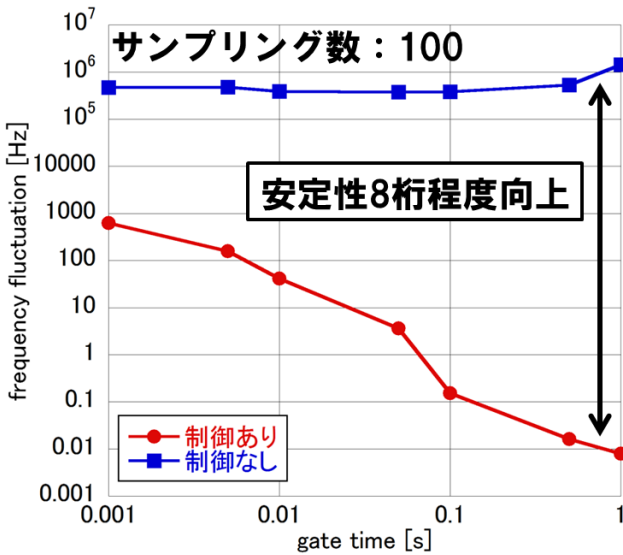


図 15 制御有無による周波数揺らぎ

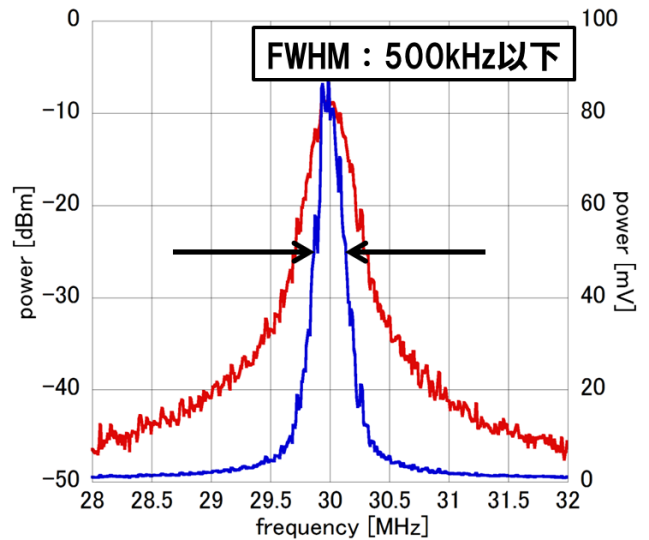


図 16 制御時のビート線幅

デュアルシンセの出力光をフォトミキシングすることにより THz 波を発生させる. 発生する THz 波の線幅を評価するため, まずは高周波 PD (帯域: 1GHz 程度) を用いてデュアルシンセのビート線幅を評価した (図 17). 700kHz 以下の線幅が得られており, 広帯域 UTC-PD を用いて発生させた THz 波においても同様の線幅を持つと考えられる.

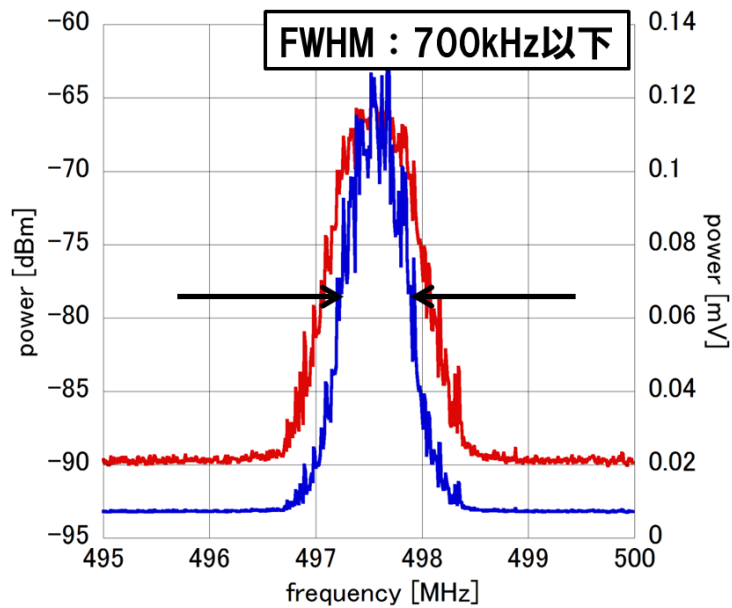


図 17 デュアルシンセのビート信号

UTC-PD から出力された CW-THz 波は、低圧ガスセル（全長：400mm，直径：40mm）を通過した後，パイロ検出器でロックイン検出された．図 18 はアセトニトリル（ CH_3CN ）ガスの透過スペクトルを示しており，コマ型分子である CH_3CN に特徴的な周期的吸収線群（周期 18.4GHz）が確認できる．連続周波数変化は 100GHz であり，従来法より 2 桁以上広い．ステップ周波数：約 5MHz，計測時間 35 分であった．また，0.625THz 付近の吸収線群を拡大するため図 19 では，ステップ周波数：約 30kHz，計測時間：10 分で同様の検出を行った．内部の微細構造が確認でき，これらは NASA データベースと良く一致している．

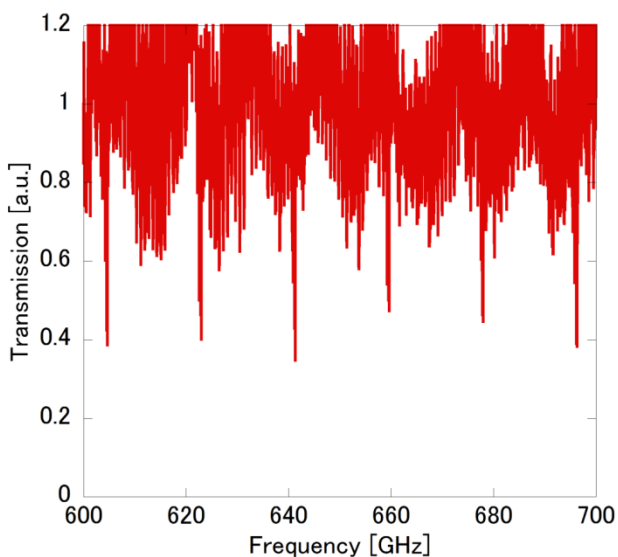


図 18 CH_3CN ガス透過透過スペクトル

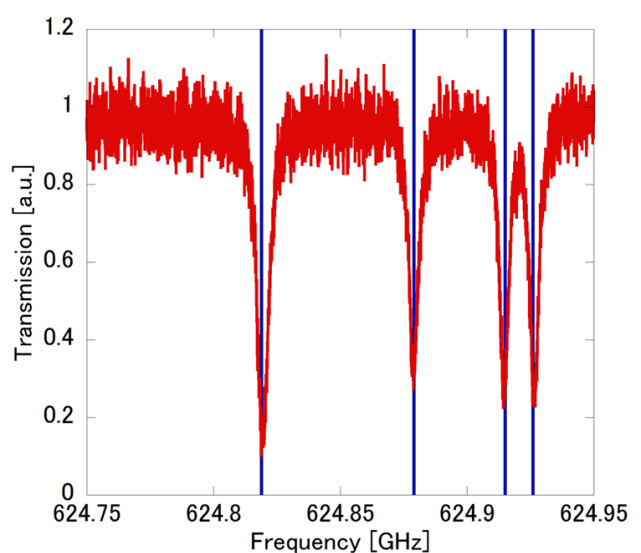


図 19 624,9GHz 帯 NASA データベース比較

5. まとめと今後の予定

光コムに CW レーザーを位相同期し，デュアル光コム参照型 THz シンセサイザを構築した．線幅

700kHz以下のTHz波が得られていると推測する。構築したTHzシンセを用いてCH₃CNガス分光を行い、100GHzにわたる周波数走査し、周期的な吸収線を観測した。また、内部の微細構造をNASAデータベースと比較し、良く一致していることを確認した。今後、厳密にデータベースとの比較を行うため、更に細かな週数操作を行う。また、アクチュエータの制御を検討し1THzの連続周波数変化を目指す。

参考文献

- [1] T. Nagatsuma, H.Ito, T.Ishibashi, “High-power RF photodiodes and their applications,” *Laser, Photon. Rev.* 3, 123-137 (2009).
- [2]K. Kawase, J. Shikata, H. Minamide, K. Imai, and H. Ito, “Arrayed silicon prism coupler for a terahertz-wave parametric oscillator,” *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 9, pp. 1423–1426, (2001).
- [3] M. Beck, D.Hofstetter, T.Aellen, J.Faist, U.Oesterle, M.Ilegems, E.Gini and H.Melchior, “Continuous Wave Operation of a Mid-Infrared Semiconductor Laser at Room Temperature” *Science* 295, 301 (2002).
- [4] Jun Ye and Steven T. Cundiff, “FEMTOSECOND OPTICAL FREQUENCY COMB TECHNOLOGY”, Springer (2004)
- [5]Qudsia Quraishi, Martin Griebel, Thomas Kleine-Ostmann, and Rudolf Bratschitsch, “Generation of phase-locked and tunable continuous-wave radiation in the terahertz regime” *Optics Letters*, Vol. 30, Issue 23, pp. 3231-3233 (2005)
- [6] 木村洗仁, “フェムト秒モード同期エルビウム添加ファイバレーザーの製作と安定化”, 徳島大学 卒業論文(2012)