

〈一般研究課題〉 高速離散波長可変テラヘルツ波光源による
リアルタイム検査技術の開発
助 成 研 究 者 名古屋大学 村手 宏輔



高速離散波長可変テラヘルツ波光源による リアルタイム検査技術の開発

村手 宏輔
(名古屋大学)

Development of real-time measurement system using rapid wavelength tunable terahertz parametric source

Kosuke MURATE
(Nagoya University)

Abstract :

Although an injection seeded terahertz wave parametric generator (is-TPG) is expected to use for various applications as a high-brightness terahertz wave source, it needs long measurement time for spectroscopy because it is a wavelength tunable source, making real-time measurement difficult. In this study, we developed an external cavity diode laser (ECDL) with a digital micromirror device (DMD) as a wavelength filter and used it as a seed source of is-TPG. As a result of this improvement, we succeeded in switching wavelengths rapidly, enabling us to measure more than 10 wavelengths at the video rate and obtain the spectrum information of reagents in real time.

1. はじめに

我々は非線形光学結晶 LiNbO_3 をマイクロチップNd:YAGレーザーで励起するテラヘルツ光源である光注入型テラヘルツパラメトリック発生器(is-TPG : injection seeded THz Parametric Generator)の開発を進めてきた[1-3]. 汎用的なテラヘルツ波測定装置であるテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)[4]と比較して検出器の有効エリアが大きく, また各周波数の強度を直接取得する(時間波形を用いない)ことから, 測定サンプルによるテラヘルツ波の散乱, 屈折, 多重反射の影響を受けにくく, 実社会で求められる遮蔽物越しの測定に適していると思われる. 実際に2003年

の研究ではis-TPGの前身のテラヘルツパラメトリック発振器(Terahertz Parametric Oscillator: TPO)を用いてテラヘルツ分光イメージングによる封筒内に隠された禁止薬物の非破壊検査を世界で初めて報告し、それに関連する研究を行った[5]。当時用いたTPOはダイナミックレンジが4桁以下であり、厚手の遮蔽物では減衰が大きかったため、国際郵便物の厚さ約0.1 mmの薄い封筒越しでしか薬物を検出できなかった。一方で近年is-TPGの大幅な高出力化に成功し、テーブルトップサイズでありながら100 kWもの高強度テラヘルツ波パルスが発生し[2]、単一周波数発振かつ0.4 - 5.0 THz [3]という広帯域周波数可変性を実現した。また、発生の逆過程でテラヘルツ波検出も可能で、検出するテラヘルツ波を種光としてLiNbO₃結晶内へ入射し、近赤外光ビームに変換して測定する手法により、高感度検出を実現している。これまでに、この高出力光源と高感度検出を組み合わせたテラヘルツ分光システムを開発し、ダイナミックレンジは12.5桁に達した[6]。図1に示す従来は難しかった減衰が-60 dBもある厚手の遮蔽物内に隠された試薬の分光[7]や、減衰が-70 dBもある硬質プラスチック製品の3次元CT[8]なども可能となった。

しかしながら、is-TPGは波長可変光源のため、ワンパルス毎に1波長しか出力できず、分光の際に波長を変える必要があり、測定時間が長くなっていた。例えば1-3 THzを10 GHz間隔で分光するためには、10分程度の時間がかかっており、実用上求められるリアルタイム測定が困難であった。そこで、これまでに多波長同時発生が試みられてきた。通常の

is-TPGでは非線形光学結晶に励起光と単一波長の注入光を入射し、一波長にエネルギーを集中させることで高出力な単一波長テラヘルツ波発生を行っている。一方で多波長発生では、注入光を多波長化することで、エネルギーを各波長に分割しテラヘルツ波の多波長化を可能とした[9]。多波長が同時に発生できれば波長を変える必要がなくなり、リアルタイム測定が実現し、タグ測定などにも利用が検討されている[10]が、その一方で波長数と同数の注入光レーザーを必要とし、闇雲に波長数を増やすことが出来ないことや、波長間での利得競合が避けられず波長数増加に伴う安定性が低下するといった課題が残っていた。

上述の問題を解決するために、本研究ではis-TPGの注入光源としてDigital Micromirror Device (DMD)を用いた新たな外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を開発することで、多波長を同時に発生するのではなく、高速に波長を切り替えることでビデオレートでの分光を目指した。さらに、検出器として我々の独自技術であるテラヘルツパラメトリック検出を用いることで、全波長情報を同時に取得し、瞬時に試薬を測定するシステムを開発した。

2. 実験方法/実験結果

2.1 テラヘルツ波パラメトリック発生/検出原理

is-TPGの原理について説明する。励起用の高強度光パルスが非線形光学結晶であるLiNbO₃結晶に

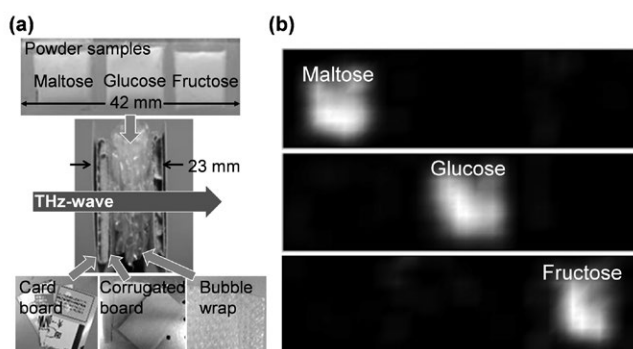


図1 is-TPGにより可能となった遮蔽物越しの試薬分光識別の様子(a)測定サンプル(b)イメージング結果

入射されると、パラメトリック発生原理に基づき励起光(ω_p)とアイドラー光(ω_i), テラヘルツ波(ω_t)の間にエネルギー保存則 $\omega_p=\omega_i+\omega_t$ と運動量保存則(ノンコリニア位相整合条件) $k_p=k_i+k_t$ を満たすよう角度を持って広帯域なアイドラー光とテラヘルツ波が発生する。図2(a)に示すこのブロードバンドなテラヘルツ波発生をテラヘルツ波パラメトリック発生(TPG)と呼ぶ。この状態では波長可変性はなく、また出力も弱い。一方図2(b)に示すようにTPGにおいて外部から光注入を行ったものが光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器(is-TPG)である[1-3]。注入光の波長と角度をノンコリニア位相整合条件を満たすように入射すると、その波長と同じアイドラー光のみが増幅され、それに伴いアイドラー光に対応したテラヘルツ波の狭線化、高出力化が実現する。この時、入射する注入光の波長と角度を、ノンコリニア位相整合条件を満たすように制御することでテラヘルツ波の波長も制御でき、広帯域波長可変性が得られる。

次にis-TPGの原理を用いたテラヘルツ波検出を説明する。図2 (c)に示すように、テラヘルツ波検出ではテラヘルツ波の発生とは逆過程で、テラヘルツ波を注入光として結晶に入射する。テラヘルツ波がLiNbO₃結晶に入射され

ることで、広帯域に発生しているアイドラー光(ここでは検出ストークス光と呼ぶ)とテラヘルツ波が狭線化・高出力化される。この時、検出ストークス光を観測すればテラヘルツ波検出[6]となり、テラヘルツ波を観測すれば増幅となる[11]が、ここでは主に検出について述べる。検出ストークス光強度は入射テラヘルツ

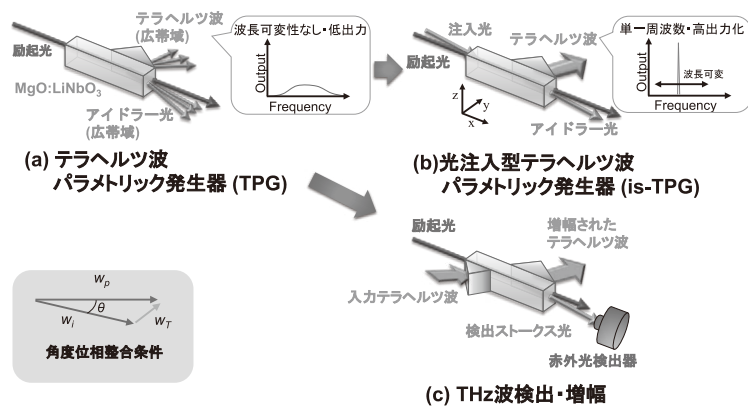


図2 テラヘルツ波パラメトリック発生/検出/増幅の原理図

ツ波の強度によって変化するため、テラヘルツ波検出が可能である。また、この検出法では、入力するテラヘルツ波の波長に応じて、角度位相整合条件に従って近赤外検出光の発生角が変化する。単一周波数の場合は近赤外検出器を動かす必要があるため波長ごとに分離できるメリットは無い。一方で多波長テラヘルツ波や高速で切り替わるテラヘルツ波の検出では、発生する近赤外検出光も多波長となる。このとき、検出光の発生角は波長ごとに異なるため、各波長を分離して検出可能である[9]。

2.2 テラヘルツ波パラメトリック発生の高速波長切り替え

本研究では、図2(b)で示したis-TPGの注入光波長を高速で切り替えることで、発生するテラヘルツ波の波長の高速切り替えを目指した。しかし、そのような注入光源は市販されておらず、本研究では図3左側に示すDMDを波長フィルターに用いたECDLを新たに開発した。本ECDLでは、回折し空間分離された光をDMD上の微小ミラーを用いて選択することで、発振波長を任意に変更できる。また、リングキャビティの導入により空間的ホールバーニングを抑制し安定的な発振を可能とした点や、インプット側からの自然放出光がレーザー出力には至らず、波長選択された光のみ出力できることからASEフリーの高S/N比出力が可能になるといった特徴を有しており、レーザー

単体としてみた場合も独自性を有している[12].

開発したECDLの出力特性を図4に示す。波長可変域は1065 nmから1089 nmまでの約24 nmであった。波長可変域は出力を光スペクトラムアナライザで測定した際、シングルモード発振を確認できた範囲と定義する。ポンプ光波長1064 nmのis-TPGのシード光源として用いた場合の発生可能なテラヘルツ波周波数を図4上軸で示す。is-TPGの波長可変域0.4 THzから5 THzをカバーできる。波長分解能は、DMDへの集光レンズの焦点距離、透過グレーティングの格子定数、DMDの微小ミラーの大きさで決まる。本システムでは、波長分解能は0.04 nmであった。

is-TPGは連続的な波長変換が可能であるため、ECDLの波長分

解能が本システムのTHz波長分解能となる。また、ECDL自身の波長切り替えレートは6.55 kHzまで確認した。高速に波長を切り替えても高い波長再現性と出力安定性(<0.39 %)を示した。これは、DMDの波長選択機構に従来のような大きな機械的なプロセスがないためだと考えている。

図3に示すように、本ECDLをis-TPGのシード光源として使用し、高速波長切り替えを行った。テラヘルツ波を高速で波長切り替えた際、0.78 THzから2.62 THzまでの1.82 THzの波長可変性を確認した。これは、従来同様の波長掃引をおこなった場合とほぼ同じであり、注入光源として問題なく使用できることが確認された。高速で切り替えられるテラヘルツ波をテラヘルツパラメトリック検出で測定し分光応用を行ったが、この際、検出ストークス光の観測にはカメラを用いた。露光時間を適切に設定することで全波長を同時かつ分離して検出可能であり、リアルタイム測定に最適である。ただし、本システムでは波長数と測定レートはトレードオフの関係にあり、任意の波長数まで増やすことができ一方で、励起光の繰り返し周波数(<100 Hz)を考えると、リアルタイム性が得られる波長数はある程度制限される。例えば、励起光の繰り返し周波数50 Hzの場合、フレームレート10 Hzで5波長の測定が可能で一方、25波長を測定する際、フレームレートは2 Hzとなる。

繰り返し周波数50 Hzの励起光を用いて1.05 THz から 2.11 THz までの10波長を高速で切り替え検出した結果を図5に示す。カメラの1フレームで全ての波長を検出できており、図中に示すように各波長の安定性も試料測定に十分な値が得られた。

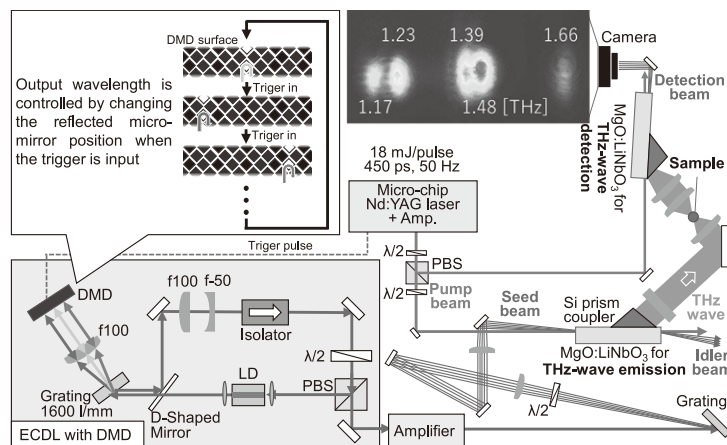


図3 DMDを用いたECDLを導入した高速波長切り替えis-TPGの実験系。

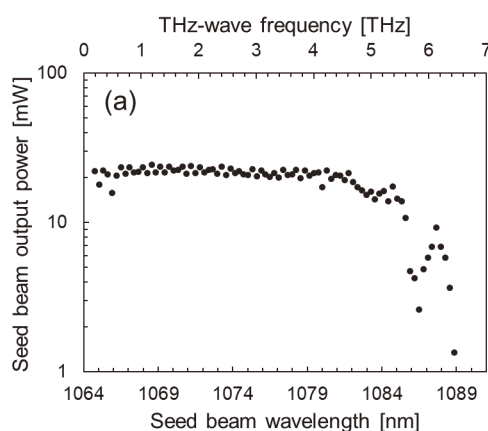


図4 DMDを用いたECDLの出力特性

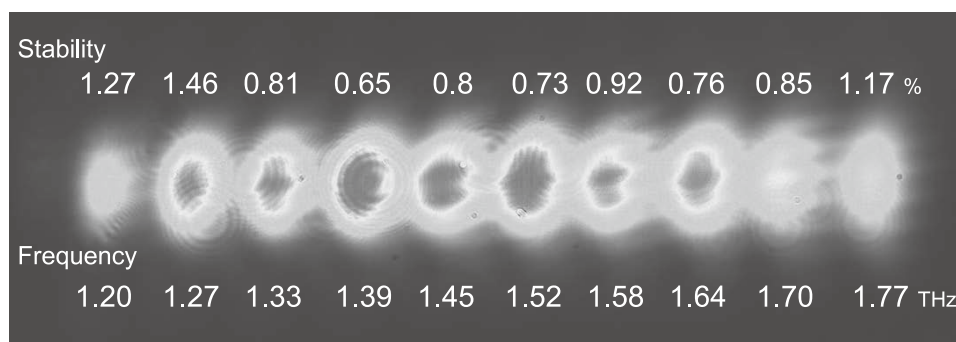


図5 10波長を高速で切り替え、全波長の検出光をカメラで同時検出した様子。

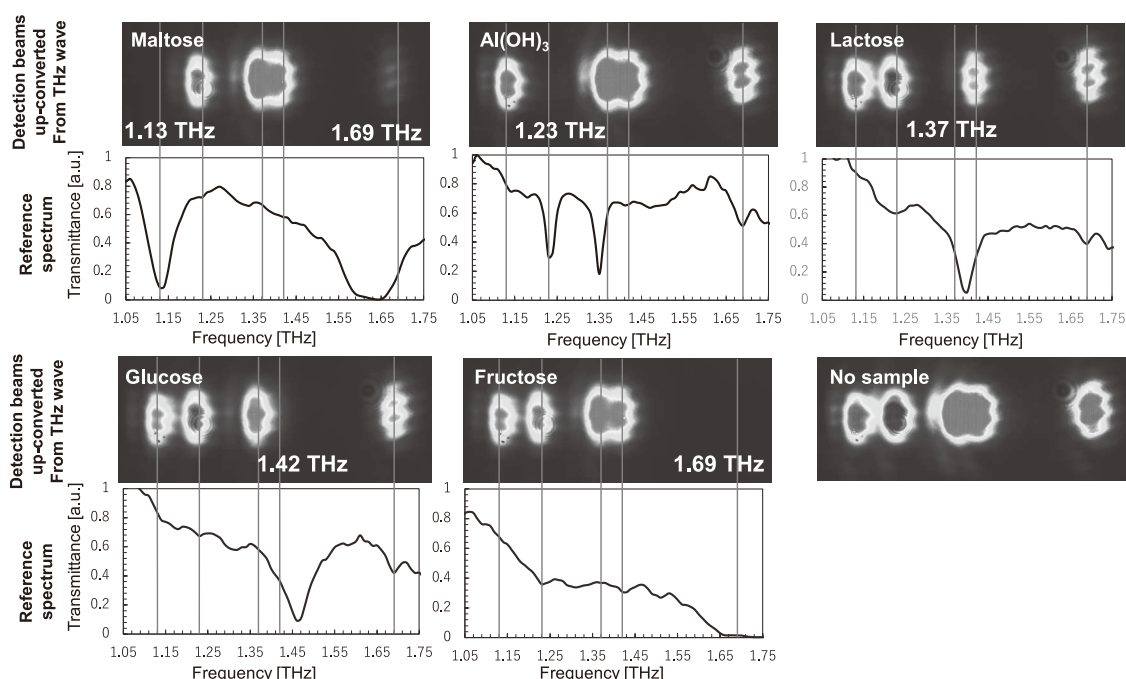


図6 5波長を高速で切り替え、様々な試薬を挿入した際の検出ストークス光の変化。それぞれの下部に掲載したレファレンススペクトルと一致した吸収が確認され、リアルタイムで試薬を測定できた。

本システムを用いて試薬の分光測定を行った結果を図6に示す。マルトース、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、ラクトース、グルコース、フルクトースの5種類の試薬を用意し、高速で切り替えた5波長のテラヘルツ波を用いて測定した。各試薬について、挿入時の検出ストークス光を上部に、レファレンススペクトルを下部に示しており、レファレンスに一致した検出ストークス光変化が確認された。ビデオレートで試薬の分光測定を実現したと言える[13]。これら検出ストークス光はカメラで画像として得られているため、機械学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク(CNN)と組み合わせることで、瞬時に試薬の識別も可能であり[10]、今後それら技術と組み合わせ、応用展開を図っていきたい。

4. まとめ及び将来展望

以上のように新たなレーザーを独自に開発することで、is-TPGの高速波長切り替えを実現し、リアルタイムでの試薬測定を可能とした。本システムは通常のis-TPGと同等の広いダイナミックレンジを有しており、分厚い遮蔽物越しでもリアルタイムで分光識別が可能であることから、テラ

ヘルツ波の新たな応用を切り開きうると考える。今後は、励起レーザーの繰り返し周波数の向上により、測定スピードを更に向上させ、波長数とリアルタイム性の両立を図っていくとともに、機械学習の本格的な導入による高精度識別を目指していきたい。

参考文献

- [1] K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata, and H. Ito, Appl. Phys. Lett. 80, 195 (2002)
- [2] S. hayashi, et al., Sci. Rep., 4, 5045 (2014)
- [3] K. Murate and K. Kawase, J. Appl. Phys., 124, 160901 (2018)
- [4] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and C. Fattinger: J. Opt. Soc. Am. B 7 (1990) 2006.
- [5] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue: Opt. Express, 11 (2003) 2549
- [6] H. Sakai, K. Kawase, and K. Murate, Opt. Lett., 45, 3905 (2020)
- [7] M. Kato, S. R. Tripathi, K. Murate, K. Imayama, and K. Kawase, Opt. Express, 24, 6425 (2016)
- [8] S. R. Tripathi, Y. Sugiyama, K. Murate, K. Imayama, and K. Kawase, Opt. Express, 24, 6433 (2016)
- [9] K. Murate, S. hayashi and K. Kawase, Appl. Phys. Express, 10, 032401 (2017)
- [10] R. Mitsuhashi, et al., Opt. Express, 28, 3517 (2020)
- [11] K. Murate, H. Sakai, and K. Kawase, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 10, 200 (2020)
- [12] S. Mine, K. Kawase, and K. Murate, Appl. Opt., 60, 1953 (2021).
- [13] S. Mine, K. Kawase, and K. Murate, Opt. Lett., 46, 2618 (2021).