○南出 泰亜、伊藤 弘昌^A (理研仙台、^A東北大学通研)

Hiroaki Minamide and Hiromasa Ito^A (RIKEN Sendai, ^ARIEC Tohoku University)

1. はじめに

最近、テラヘルツ (THz) 波の利用に関心が高まっている。生物学、医療、薬学、生体分子化学など広い基礎研究分野から、THz 波が衣服など透過する性質から安心・安全技術としてセキュリティ応用、更には紙、木材、プラスチック、粉乳などに対する透明性から非破壊診断、食品検査、材料検査など産業応用まで多方面での注目が集まっている。

光とマイクロ波・ミリ波の境にある電磁波周波数領域である THz 帯には、固体中のフォノンや生体などを構成する分子の固有振動、分子間相互作用に関連したエネルギー準位が多数存在する。これらは、THz 指紋スペクトルとして観察され、THz 波応用では基礎データとなるものである。

我々は、この指紋スペクトルを利用するような幅広い応用分野で使用する THz 波光源として、非線形光学結晶 LiNbO_3 を用いた光波帯からの直接波長変換による THz 波パラメトリック光源の開発を進めてきた。この THz 波パラメトリック光源は、卓上型、常温動作、高い時間的・空間的コヒーレンシーを有するなどの特色をもち、約 1~3THz の領域で連続周波数可変である。

特に、分光イメージングや分光計測を短時間に行うためには、周波数を高速に波長選択やスキャンを行う必要がある。また、光源の性能としては、低発振閾値で、小型であることが、広く利用できる光源として重要となる。

本報告では、これらの性能満たす高速波長可変モノクロマチック THz 波パラメトリック光源の開発の現状と、応用として THz 波分光イメージングに関して述べる。

2. 高速波長可変 THz 波光源

非線形光学結晶を用いた波長可変 THz 波パラメトリック光源の開発は、将来の THz 波応用での重要性であるとの考えから、1996 年に東北大学伊藤研究室において独自の手法にて波長可変 THz 波発振器 (THz-wave Parametric Oscillator: TPO) を実現した¹⁾。我々は、更なる高性能化、また利便性を高めるため、新手法を提案し研究を行ってきた。

THz 波パラメトリック光源では、 MgO を添加した LiNbO_3 結晶を用い、その光学活性の横波格子振動 (TO phonon、 A_1

softest mode) と THz 波との混成波であるボラリトンによる誘導ラマン散乱により、励起光 (ω_p)、アイドラー光 (ω_i)、および THz 波 (ω_T) の 3 波間のパラメトリック相互作用が強く生じさせる。その結果、励起光が閾値を超えると同程度のコヒーレンシーを有するアイドラー光および THz 波がノンコリニアに発生する。パラメトリック相互作用では、励起光とアイドラー光のなす角度 (位相整合角) を制御することで位相整合条件が変わり周波数選択が可能となる。実際には、角度を約 1~3deg. の範囲で変化させ、1~3THz の同調範囲が得られる。

高速に波長変換可能な光源開発は、THz 波分光イメージングや、リアルタイムガス分光などを行う際に特に重要である。高速に波長を変化させることで計測時間の短縮化を行うことができる。リング型 THz 波パラメトリック発振器では、1 枚のミラーを回転制御するだけで、位相整合条件を変化させランダムに波長選択を可能とする方法を実現した²⁾。図 1 に 3 枚の平面鏡 (M_1 、 M_2 、 M_3) でアイドラー光の共振器を構成したリング型 TPO を示す。

M_1 、 M_3 は、励起光 (1.064 μm) とアイドラー光 (> 1.067 μm) を切り分ける誘電体多層膜を施した高性能ミラーである。 M_2 は、全面 HR コートを施している。発振波長制御は、高性能なガルバノ光学スキャナー上に設置した M_3 を回転制御して行った。波長同調範囲は、0.93~2.7THz の広帯域範囲が得ら

図 1. リング型 THz 波パラメトリック発振器の実験系

図2. 準モノリシック・リング型 TPO の実験系

れた。本光源の波長選択速度は、ガルバノスキャナーの設定速度 ($\sim 1\text{kHz}$) と励起光源の繰り返し周波数に依存するが、現状では励起光源の繰り返し周波数で制限されており、 500Hz (2ms) の速度までの波長選択速度を実現している。

また、実用的な光源への取り組みとして、発振の低閾値化を行っている。角度位相整合では、有限の励起光ビームサイズに対して相互作用長や相互作用体積が重要なパラメータとなる。より発振閾値を下げるには、共振器長を短くし励起光とアイドラー光の位相整合時間をできるだけ長く確保する必要がある。これを実現する光源として、図2のような準モノリシック・リング型 TPO を開発した。

非線形光学結晶には、サイズ $15 \times 20\text{mm}^2$ の $5\text{mol}\%\text{MgO}$ 添加 LiNbO_3 を使用し、励起光 ($1.064\mu\text{m}$, 13ns , 400Hz) とアイドラー光 ($\sim 1.07\mu\text{m}$) が、結晶内の3面で全反射するように、2つの角をカットした。また、ノンコリニア位相整合条件のもと、その内の1面から面に垂直に THz 波が出射するように設計している。励起光とアイドラー光の分離は、高性能ミラーを使用し、結晶外で行った。同時に、本ミラーの位置を直線的に移動制御することで、位相整合条件を変化させ周波数同調ができるようにしている。共振器長 (光学) は、約 110mm である。

結果として、励起光エネルギー 5mJ/pulse (強度 24MW/cm^2) で発振が確認でき、これまでの $1/2 \sim 1/3$ の低発振しきい値を実現した。また、励起光エネルギー 14mJ/pulse で THz 波出力約 70pJ/pulse が得られ、高効率に THz 波を発生させることができた。

3. THz 波分光イメージング応用³⁾

リング型 THz 波パラメトリック発振器の性能の実証とし

図3. 同一試料中に不均一に分散したグルコースとマルトースの濃度分布

て分光イメージングへの応用を行った。試料にはポリエチレン粉末中にグルコースとフルクトースをそれぞれ濃度 $10\text{wt}\%$ で均一および不均一に分散させたペレットを用いた。繰り返し周波数 500Hz の励起光源を用い、それぞれの成分の吸収線に合わせるように波長制御を行い、イメージングの測定を行った。ピクセルあたり5点の異なる波長の透過率を5ハルスごとに平均化し、そのスペクトルデータを重回帰分析することで糖、ポリエチレンの濃度をリアルタイムで解析した。ピクセル分解能は $250\mu\text{m}$ 、測定時間はおよそ 2cm 四方の領域で解析時間も含め約5分で得られた。結果として、高速で精度よく濃度分布を測定できることが示された (図3)。

4. まとめ

高速波長可変 THz 波光源の開発を行った。また、より小型で発振閾値の低い光源として、準モノリシック・リング型 TPO の開発を進めている。THz 波本装置は繰り返し周波数に同期して波長制御することができるため、高速な分光イメージングが可能であり、試料内に分散した複数種の糖の濃度分布について分析を行った。本 THz 波光源は、幅広い THz 波応用分野での利用が期待できる。

謝辞

本研究の一部は文部科学省プロジェクト「医療用テラヘルツ光診断システムの開発」(代表者 西澤潤一) の支援を受けた。また、分光イメージングの実験は、秋山浩一氏 (三菱電機株式会社) の協力のもとで行われた。深く感謝致します。

参考文献

- 1) K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi, and H. Ito: Appl. Phys. Lett. 68 (1996) 2483.
- 2) 南出泰亜, 川瀬晃道, 今井一宏, 佐藤篤, 伊藤弘昌: レーザー研究 29 (2001) 744
- 3) K. Akiyama, T. Ikari, Y. Ishikawa, H. Minamide, and H. Ito, Photonic Applications, Systems and Technologies Conference (PhAST 2006), PThD2, Long Beach, (2006).