

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18079

研究課題名(和文) 台形型MgO:LiNbO<sub>3</sub>結晶を用いた高感度フレキシブルテラヘルツ波分析器の開発研究課題名(英文) Development of sensitive and flexible terahertz-wave analyzer using trapezoidal MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal

研究代表者

瀧田 佑馬 (TAKIDA, Yuma)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・基礎科学特別研究員

研究者番号：50714820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：台形型MgO:LiNbO<sub>3</sub>結晶を用いた面放射方式により、1 kW以上のピークパワーを有する高出力テラヘルツ波発生および最大で70 dBのダイナミックレンジを有する高感度テラヘルツ波検出を実現した。また、台形型結晶を平行移動させてテラヘルツ波出力の結晶長依存性を測定することにより、テラヘルツ波発生・検出の光学系設計において重要な物理パラメーターであるパラメトリック利得の測定に成功した。

研究成果の概要(英文)：kW-peak-power terahertz-wave parametric generation and 70 dB-dynamic-range sensitive detection have been demonstrated by using efficient surface-coupling configuration based on trapezoidal MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystals. By measuring the crystal-length dependence of terahertz-wave output using the trapezoidal crystal, the parametric gain of MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal has been determined for the first time.

研究分野：レーザー光学，テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツ波 非線形光学波長変換 高出力発生 高感度検出 MgO:LiNbO<sub>3</sub>結晶

### 1. 研究開始当初の背景

ニオブ酸リチウム ( $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ) 結晶を用いた非線形波長変換によるテラヘルツ (THz) 波の高出力発生・高感度検出技術は、多様化する THz 波応用にフレキシブルに対応できる計測手法へと発展する可能性を秘めている。しかしながら、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶は THz 波領域において非常に大きな分散を有し、その吸収係数は 7.5 THz に存在する横光学フォノンモードに近づくにつれて指数関数的に増加する。そのため、従来の長方形型  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を用いた方式では、結晶内部で発生した THz 波が外部へと取り出されるまでに大きく減衰するため、得られる THz 波出力が制限されるという課題があった。その影響は、特に 2 THz 以上の高周波数領域においてより顕著であり、同様に  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を用いて THz 波を検出する場合においても障害となっている。一方で、THz 波の計測対象となる液体、生体、ソフトマテリアルなどのサンプルは、周波数が高くなるにつれて不透明になる傾向があるため、分光分析のツールとして観点から高周波数領域において高感度でダイナミックレンジの広い THz 波分析器の開発が強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、台形型  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を用いた面放射方式によって吸収損失を大幅に低減し、特に 2 THz 以上の高周波数領域において高出力発生・高感度検出を実証する。さらに、発生から検出までの THz 波の取り回しに中空ファイバーの導入を検討することで、様々な実験環境にフレキシブルに対応できる実用的な THz 波分析器の要素技術開発を行う。

### 3. 研究の方法

まず、台形型にカットした  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶による面放射方式を用いて結晶内での THz 波の伝搬距離を最小化し、吸収損失を低減することで特に 2 THz 以上の高周波数領域において高出力な THz 波発生・高感度な THz 波検出を行う。励起光には所属する研究チームが所有するマイクロチップレーザーと Nd:YAG 光増幅器からのサブナノ秒光パルスを用いて、実験を進める。

続いて、発生から検出までの THz 波の取り回しに中空ファイバーの導入を検討する。台形型  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を用いた面放射方式では、THz 波は励起光が全反射する一点のみから放射されるため、中空ファイバーに高い効率で直接結合させることができる可能性がある。

### 4. 研究成果

台形型  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を用いた面放射方式による実験の結果、1.1 THz から 2.8 THz の広帯域な周波数領域において 1 kW 以上のピ

ーク出力を有する高出力テラヘルツ波発生と最大で 70 dB のダイナミックレンジを有する高感度テラヘルツ波検出を達成した。この成果は、CLEO:2015 国際会議他にて発表を行った。

続いて、テラヘルツ波発生・検出のさらなる高性能化を目指して、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶のパラメトリック利得のテラヘルツ波周波数依存性の測定を行った。これまで実験的に明らかになっていないパラメトリック利得を測定することは、テラヘルツ波発生・検出を正確に設計する上で重要であり、理論計算値と比較することでさらなる高性能化が期待できる。実験では、台形型  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を平行移動させることで実効的な結晶長を連続パラメータ化できる点に着目し、テラヘルツ波出力の結晶長依存性の詳細を初めて測定した。その結果、テラヘルツ波出力は閾値結晶長を超えると指数関数的に増大し、パラメトリック利得と閾値結晶長はテラヘルツ波周波数に依存することを明らかにした (図 1)。この結果から  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶を用いたテラヘルツ波発生・検出を正確に設計することができるようになり、励起条件と結晶長の最適化によってピークパワーで 1 MW を超えるテラヘルツ波出力ならびにダイナミックレンジで 100 dB を超えるテラヘルツ波検出の実現に向けた指針を得た。この成果は、Phys. Rev. A 誌他にて発表を行った。

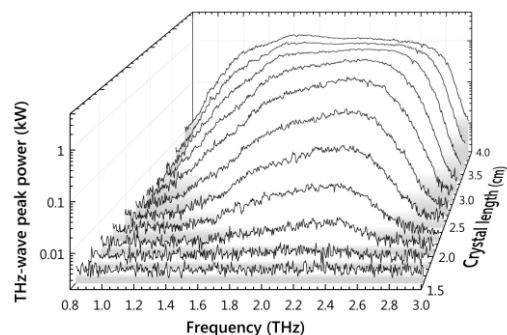


図 1. THz 波出力の結晶長依存性

さらに、高感度テラヘルツ波検出系の応用範囲拡大を目指して、電子デバイスである共鳴トンネルダイオード (RTD) からの連続波テラヘルツ波に対して非線形波長変換による高感度検出を行った。RTD は電源供給のみで動作する小型テラヘルツ波光源動作であるため、実用的な分光分析システム開発の観点から有利である。実験の結果、発振周波数 0.58 THz、0.78 THz、および 1.14 THz の RTD からの連続波かつマイクロワットレベルのテラヘルツ波出力の非線形波長変換を実現し、周波数 1.14 THz のとき最小検出可能パワーとして約 5 nW の高感度検出を室温で達成した (図 2)。実験に用いた励起光のパルス幅 (0.31 ns) を考慮すると、実際に波長変換に寄与したテラヘルツ波の光子数は約 2700

個に相当する。また、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶のノンコリニア位相整合条件を利用することで、周波数の異なる RTD とテラヘルツ波パラメトリック発振器からの複数周波数のテラヘルツ波の同時検出を行い、光源の周波数を切り替えることなく差分イメージが取得できることを実証した (図 3)。これらの成果は、*Opt. Express* 誌および *AIP Advances* 誌他にて発表を行った。

最後に、中空ファイバーの導入について検討を行った。THz 波用中空ファイバーは、伝搬損失が約 10 dB/m と比較的大きいことが報告されている。そのため、最初の原理実証実験として、本研究では内径 1 mm、長さ 20 cm の THz 波用中空ファイバーを入手し、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  結晶の THz 波発生点の直近に配置することで、THz 波の直接結合を試みた。その結果、中空ファイバーを配置しないときと比べて約 10 分の 1 の THz 波出力がもう片方の中空ファイバー端から得られたため、THz 波の中空ファイバーへの直接結合を確認した。今後は、使用する中空ファイバーを 1 m 程度と長くすることで、様々な実験環境にフレキシブルに対応できる THz 波分析器の確立を目指す。

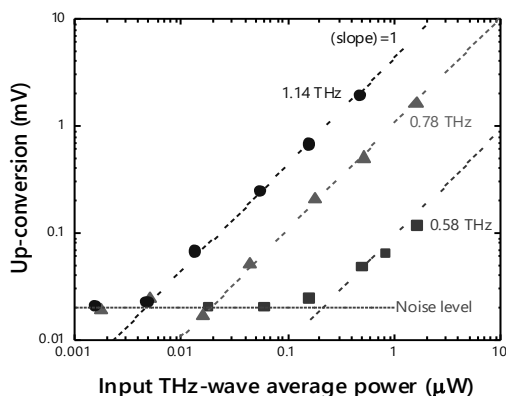


図 2. RTD を光源に用いた THz 波検出の入出力特性

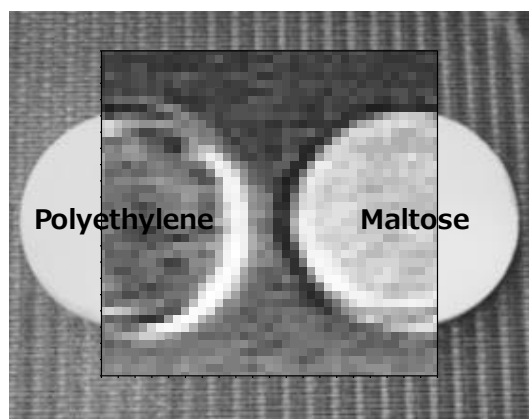


図 3. 二周波数同時 THz 波検出を用いた差分イメージング例

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, “Nonlinear optical detection of terahertz-wave radiation from resonant tunneling diodes,” *Opt. Express*, Vol. 25, No. 5, pp. 5389-5396 (2017). (DOI: 10.1364/OE.25.005389) [査読有]
- [2] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, “Terahertz-wave differential detection based on simultaneous dual-wavelength up-conversion,” *AIP Advances*, Vol. 7, Issue 3, 035020 (2017). (DOI: 10.1063/1.4979405) [査読有]
- [3] 河野 行雄, 瀧田 佑馬, “THz 分光測定のコツ,” *応用物理*, 5 月号, pp. 428-432 (2016). (URL: <http://www.jsap.or.jp/ap/2016/05/ob850428.xml>) [査読無]
- [4] Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, “Terahertz-wave parametric gain of stimulated polariton scattering,” *Phys. Rev. A*, Vol. 93, Issue 4, 043836 (2016). (DOI: 10.1103/PhysRevA.93.043836) [査読有]

[学会発表] (計 18 件)

- [1] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, “Simultaneous nonlinear up-conversion of dual-frequency terahertz-wave radiation,” *Nonlinear Optics (NLO) 2017, Hawaii (USA)*, (Jul. 18, 2017). [Oral] [Accepted]
- [2] Y. Takida, K. Nawata, S. Suzuki, M. Asada, and H. Minamide, “Nonlinear optical detection of terahertz-wave radiation from resonant-tunneling-diode oscillators,” *Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2017)*, Munich (Germany), (Jun. 25, 2017). [Oral] [Accepted]
- [3] [Invited] Y. Takida and H. Minamide, “Frequency-domain spectroscopy using high-power tunable THz-wave sources: towards THz sensing and detector sensitivity calibration,” *SPIE Defense + Commercial Sensing, Anaheim (USA)*, (Apr. 11, 2017). [Oral]
- [4] 瀧田 佑馬, 縄田 耕二, 鈴木 左文, 浅田 雅洋, 南出 泰亜, “共鳴トンネルダイオードから発生した THz 波の非線形波長変換検出,” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市), (2017 年 3 月 14 日). 【口頭】
- [5] [Invited] Y. Takida and H. Minamide,

- “Nonlinear photonics for efficient terahertz-wave technology,” 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2016), 東北大学さくらホール (宮城県・仙台市), (Nov. 2, 2016). [Oral]
- [6] [Invited] Y. Takida and H. Minamide, “Frequency-domain tunable THz-wave sources and spectroscopic measurements,” 7th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano VII), Porquerolles (France), (Oct. 6, 2016). [Oral]
- [7] Y. Takida, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, “Sensitive terahertz-wave detection based on depleted pump energy in nonlinear up-conversion process,” 41th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2016), Copenhagen (Denmark), (Sep. 28, 2016). [Poster]
- [8] [Invited] Y. Takida and H. Minamide, “Terahertz-wave technology based on nonlinear optical effect and sub-nanosecond pulse laser,” The 4th Laser Ignition Conference 2016 (LIC'16), パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市), (May. 20, 2016). [Oral]
- [9] Y. Takida, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, “Injection-seeded terahertz-wave parametric generator at 77 K,” The 5th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'16), パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市), (May. 20, 2016). [Oral]
- [10] [Invited] 瀧田 佑馬, 四方 潤一, 縄田 耕二, 時実 悠, 韓 正利, 小山 美緒, 野竹 孝志, 林 伸一郎, 南出 泰亜, “高出力THz波発生に向けたMgO:LiNbO<sub>3</sub>結晶のパラメトリック利得の測定,” 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都・目黒区), (2016年3月20日). 【口頭】 [講演奨励賞受賞記念講演]
- [11] [Invited] Y. Takida and H. Minamide, “Nonlinear optical crystals for efficient terahertz-wave generation and detection,” 7th International Symposium on Optical Materials (IS-OM7), Lyon (France), (Mar. 3, 2016). [Oral]
- [12] 瀧田 佑馬, 四方 潤一, 南出 泰亜, “高出力テラヘルツ波発生に向けたニオブ酸リチウム結晶のパラメトリック利得の測定,” テラヘルツ科学の最先端 II, 作並温泉岩松旅館 (宮城県・仙台市), (2015年11月19日). 【ポスター】
- [13] 瀧田 佑馬, 南出 泰亜, “高出力テラヘルツ波発生に向けたフォノンポーラリトンのパラメトリック利得の測定,” 理研シンポジウム：第三回「光量子工学研究領域」, 理化学研究所和光事業所鈴木梅太郎記念ホール (埼玉県・和光市), (2015年11月12日). 【ポスター】
- [14] Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, “Gain measurement of stimulated phonon-polariton scattering in MgO:LiNbO<sub>3</sub> for high-peak-power terahertz-wave parametric generation,” The 76th JSAP Autumn Meeting 2015, 名古屋国際会議 (愛知県・名古屋市), (Sep. 15, 2015). [Oral] 【第39回 (2015年秋季) 応用物理学会講演奨励賞受賞】
- [15] 瀧田 佑馬, “非線形光学波長変換によるテラヘルツ波の高出力発生および高感度検出,” 平成27年度日本学術振興会育志賞研究発表会, 京都大学百周年時計台記念館 (京都府・京都市), (2015年8月31日). 【ポスター】
- [16] Y. Takida, T. Notake, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, S. Hayashi, and H. Minamide, “Gain measurement of MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal in injection-seeded terahertz-wave parametric generation,” Nonlinear Optics (NLO) 2015, Kauai (USA), (Jul. 28, 2015). [Oral]
- [17] Y. Takida, T. Notake, K. Nawata, Y. Tokizane, S. Hayashi, and H. Minamide, “kW-peak-power terahertz-wave parametric generation and 70 dB-dynamic-range detection based on efficient surface-coupling configuration,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO:2015), San Jose (USA), (May 11, 2015). [Oral]
- [18] Y. Takida, T. Notake, K. Nawata, Y. Tokizane, S. Hayashi, and H. Minamide, “High-peak-power terahertz-wave parametric generation and highly-sensitive detection using surface-coupling configuration,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'15), パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市), (Apr. 23, 2015). [Oral]

#### [その他]

プレスリリース (2017年3月2日) : 光波長変換によりテラヘルツ波を高感度に検出 - 室温で動作するテラヘルツ波領域の小型非破壊検査装置の実現へ -  
[http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170302\\_2/](http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170302_2/)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

瀧田 佑馬 (TAKIDA, Yuma)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・基礎科学特別研究員

研究者番号 : 50714820