

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 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：15K18080

研究課題名(和文) 光のホール効果観測の為のサブテラヘルツ波発生

研究課題名(英文) Sub-THz wave generation for the measurement of optical Hall effect

研究代表者

時実 悠 (Tokizane, Yu)

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：80648931

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)：光の発生、検出が困難なサブテラヘルツ領域(<1THz)において、非線形光学を用いた周波数可変サブテラヘルツ光源を開発した。光注入型の近赤外周波数可変二波長光源を開発し有機非線形光学結晶DASTを励起する事で、差周波発生による周波数可変サブテラヘルツ光源を実現した。0.3THzから4THz及び0.19THzから3THzの広帯域周波数可変性を実現した。また、光源を用いてサブテラヘルツ領域でサンプル内部構造の非破壊イメージングや分光イメージングを実証した。本光源はサブテラヘルツ波の特性を生かした非破壊分光イメージング、リモートセンシング、光ホール効果などの物理現象の観測などへの利用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Sub-THz frequency of the electromagnetic wave is a region where high power sources or sensitive detectors are insufficient even though sub-THz wave would be applicable to non-destructive imaging, remote sensing or measurements in fundamental physics such as the optical Hall effect. In this research, I developed the tunable sub-THz wave source using nonlinear photonics by pumping a nonlinear crystal of DAST. The DAST crystal was pumped by the originally developed injection seeded dual-wavelengths infrared source. It was also demonstrated by the sub-THz wave source that the non-destructive imaging of internal structure of a sample and spectrum imaging of a sample were possible. It is expected that further applications in spectrum imaging or remote sensing to various materials utilizing high transmission of sub-THz wave.

研究分野：テラヘルツ光学

キーワード：テラヘルツ サブテラヘルツ 光パラメトリック発生

## 1. 研究開始当初の背景

電波と光の中間周波数に位置するテラヘルツ電磁波領域は、電波技術でも光技術でも発生の困難な周波数であった為、テラヘルツギャップと呼ばれてきた。しかし、超高速電子デバイスや非線形光学、半導体レーザー技術の革新により電波と光の周波数極限はサブテラヘルツ周波数領域(<1THz)で重なりつつある。よって周波数ギャップはほぼ埋まったといえるが、サブテラヘルツ帯で高出力性と周波数可変性を満足する光源が十分に存在するとはいえない。この領域は最後に残された「サブテラヘルツギャップ」といえる。サブテラヘルツギャップを埋める高出力かつ周波数可変なサブテラヘルツ光源を実現すれば、電波と光、両者の技術を組み合わせ、高い周波数を活かした超高速無線通信、高い透過率を生かした非破壊分光イメージングなど様々な応用が期待される。また、電波で考慮されていなかった物理現象や、光で顕著に現れない物理現象、例えば光のホール効果が顕在化する可能性がある。

## 2. 研究の目的

サブテラヘルツギャップを埋める安定な周波数可変サブテラヘルツ波光源を構築し、光ホール効果の観測を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 近赤外二波長光励起による DAST 結晶を用いたサブテラヘルツ波光源の開発

DAST 結晶は高い非線形係数と広い位相整合周波数範囲を有し、差周波発生を用いた広帯域なサブテラヘルツ周波数可変光源の非線形結晶として適する。しかし、従来 DAST 結晶におけるサブテラヘルツ帯における差周波発生は困難であった。これは差周波発生励起光の近赤外二波長光源に光パラメトリック発振器を用いていたため、二波長光の周波数差を小さくすることが困難であった事による。そこで、サブテラヘルツ波発生の励起光源を実現するため、共振器構造を持たない独自の二波長光注入型光パラメトリック発振器の開発し、二波長差の小さな近赤外波長可変二波長光源を開発する。また開発した光源を用いて DAST 結晶を用いた差周波発生により周波数可変サブテラヘルツ波発生を実現する。

### (2) DAST 励起サブテラヘルツ光源の周波数拡張及び安定化

サブテラヘルツ波光源の応用展開を見据え、開発した光源の周波数可変範囲の拡張および光源の安定化を図る。具体的には周波数可変範囲の拡張の為、励起波長を最適化し、

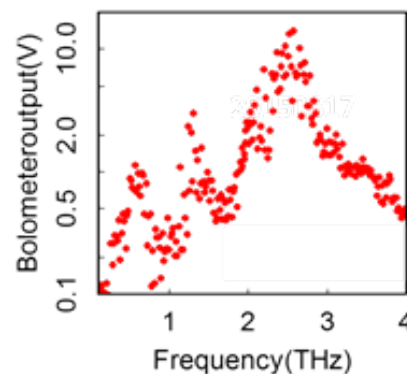
DAST 結晶の位相整合条件に適した  $1 \mu\text{m}$  帯の二波長光源を用いる。また、安定な  $1 \mu\text{m}$  帯二波長光源の開発の為、二波長光の発生源を分離する。

## 4. 研究成果

### (1) 近赤外二波長光源励起による DAST 結晶を用いたサブテラヘルツ波光源

DAST 結晶励起用の近赤外波長可変二波長光源を開発した。 $1 \mu\text{m}$  帯と  $1.3 \mu\text{m}$  帯でそれぞれ近赤外波長可変二波長光源を開発した。BBO 結晶を用いた光注入型光パラメトリック発生により波長可変二波長光源を開発した。光パラメトリック発生において、非線形結晶のウォークオフ効果によって高出力発生が妨げられることが明らかになった為、非同軸位相整合を用いた独自の手法を用いパラメトリックゲインの補償に成功した。以上により  $1.3 \mu\text{m}$  帯と  $1 \mu\text{m}$  帯それぞれにおいてサブ mJ の出力を持つ近赤外波長可変二波長光源を開発した。

また、開発した  $1.3 \mu\text{m}$  帯二波長光源によって DAST 結晶を励起し、注入光の波長を掃引する事で、周波数範囲  $0.3 \text{ THz}$  から  $4 \text{ THz}$  の広帯域に周波数可変なサブテラヘルツ波出力を得た(図 1)。サブテラヘルツ帯においては  $0.6 \text{ THz}$  で最大出力  $80 \text{ pJ}$  の高出力を得た。また出力の帯域幅を観測し狭帯域性を確認した。以上によって広帯域に周波数可変な高出力サブテラヘルツ波光源の開発に成功した。この成果は Applied Physics Express 誌に掲載された。



(図 1) 発生テラヘルツ波の周波数同調特性

### (2) DAST 励起サブテラヘルツ光源の周波数拡張及び安定化

(1) で開発した周波数可変サブテラヘルツ波光源の周波数可変範囲の拡張の為、励起波長の最適化の為、 $1 \mu\text{m}$  帯の二波長光を用いた。またサブテラヘルツ波の出力の安定化の為、差周波発生に必要な近赤外二波長光(波長 $\lambda_1, \lambda_2$ )の発生源を以下のように分離し

た。一波長光注入型の光パラメトリック発生を行い、波長可変  $1\ \mu\text{m}$  帯近赤外光( $\lambda_1$ )を発生させた。また光パラメトリック発生を励起光  $0.532\ \mu\text{m}$  の基本波である  $1.064\ \mu\text{m}$  を再利用し $\lambda_2$  として用いた。これらの二波長光を合波した。これにより一波長の光パラメトリック過程のみで二波長光源が実現する為、光源の安定化が可能である。この二波長光源を用いて DAST 結晶を励起した。信号光を液体ヘリウム冷却型のポロメーターで発生サブテラヘルツ光を観測した。この結果周波数可変範囲を  $0.19\ \text{THz}$  から  $3\ \text{THz}$  に拡張することに成功した。また、光源の安定性評価のためラクトースペレットサンプルの透過分光イメージングを行い複数の周波数で透過二次元画像を得ることに成功した。また、交通用 IC カードの透過イメージングを行ったところ、内部の回路や部品を非破壊測定可能なことが分かった。本光源は分光イメージング、非破壊測定などの応用に幅広く利用できる安定性を持つことが示された。しかし、本光源のエネルギーは THz カメラで十分に観測可能とはいえない。したがって光ホール効果の測定に用いるためには、今後さらなる高強度な THz 波光源の開発が必要である。

#### 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. Yu Tokizane, Kouji Nawata, Zhengli Han, Mio Koyama, Takashi Notake, Yuma Takida and Hiroaki Minamide, "Tunable terahertz waves from DAST pumped with a dual-wavelength injection-seeded optical parametric generation," Appl. Phys. Express, **10**, 022101 (2017). 10.7567/APEX.10.022101, 査読あり.
2. Shin'ichiro Hayashi, Kouji Nawata, Yuma Takaida, Yu Tokizane, Kodo Kawase, Hiroaki Minamide, "High-Brightness Continuously Tunable Sub-Terahertz Wave Generation," Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol. **6**, Issue **6**, 858 (2016). 10.1109/TTHZ.2016.2611939, 査読あり
3. Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, "THz-wave parametric gain of stimulated polariton scattering," Phys. Rev. A, Vol. **93**, Issue 4, 043836 (2016). 10.1103/PhysRevA.93.04383, 査読あり
4. 時実 悠・縄田耕二・韓 正利・小山美緒・野竹孝志・瀧田佑馬・南出泰亜, "高出力周波数可変サブテラヘルツ波発生のため

ための非線形波長変換技術", 信学技報, 115, 53(2015). 査読なし

[学会発表](計 9 件)

1. 時実悠、南出泰亜, "非破壊分光イメージングにむけた高速波長可変低周波テラヘルツ光源の開発," 第3回理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ, (NICT、小金井市・東京都、2017.2.27)
2. 時実悠、南出 泰亜, "低周波数テラヘルツ波光源開発の現状と光計測応用への展望," 第13回エクストリームフォトニクス研究会, (ホテル竹島、蒲都市・愛知県、2016.11.14).
3. 時実悠, "非破壊分光イメージングにむけた高速周波数可変サブテラヘルツ波光源の開発", 理研シンポジウム 第4回「光量子工学研究」若手・中堅研究者から見た光量子工学の展開, (理研、和光市・埼玉県, 2016.11.1)
4. Yu Tokizane, Kouji Nawata, Zhengli Han, Mio Koyama, Takashi Notake, Yuma Takida, Hiroaki Minamide, "Generation of sub-THz waves with narrow linewidth and wide tunability by DAST-DFG," The Mid-Infrared Coherence Sources (MICS) Meeting, (Long Beach, USA 2016.3.22).
5. 時実 悠, 縄田 耕二, 韓 正利, 小山 美緒, 野竹 孝志, 瀧田 佑馬, 南出 泰亜, "高出力周波数可変サブテラヘルツ波発生のための非線形波長変換技術," 電子デバイス研究会, (東北大学、仙台・宮城県、2015.12.22).
6. 時実 悠, 縄田 耕二, 韓 正利, 小山 美緒, 野竹 孝志, 瀧田 佑馬, 南出 泰亜, "光注入型光パラメトリック発生を励起光とした広帯域周波数可変なサブテラヘルツ波光源," 2015年第76回応用物理学会秋季学術講演会, (名古屋国際会議場、名古屋市・愛知県、2015.9.16).
7. Yu Tokizane, Yoshiki Miyake, Kouji Nawata, Shuzhen Fan, Shin'ichiro Hayashi, Takashi Notake, Atsushi Sato, Yuma Takida and Hiroaki Minamide, "Tunable sub-THz wave source from DAST-DFG pumped by a dual-wavelength, injection-seeded BBO OPG system," The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology, (アクトシティ、浜松市・静岡県、2015.8.31).
8. Yu Tokizane, Yoshihiko Miyake, Kouji

Nawata, Shuzhen Fan, Shin'ichiro Hayashi, Takashi Notake, Atsushi Sato, Yuma Takida, and Hiroaki Minamide, "Sub-THz wave generation from DAST crystal pumped by an is-BBO-OPG system," European Quantum Electronics Conference, (Munich, Germany, 2015.6.22).

9. Y. Tokizane, Y. Miyake, K. Nawata, S. Fan, S. Hayashi, T. Notake, A. Sato, Y. Takida, and H. Minamide, "Sub-THz wave generation in DAST-DFG configuration pumped by a dual-wavelength, injection-seeded BBO OPG system," The 4th Advanced Lasers and Photon Sources, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan 2015.4.24).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

時実 悠 (Tokizane, Yu)  
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：80648931

##### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

なし ( )

#### (4) 研究協力者

南出 泰亜 (Minamide, Hiroaki)  
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学  
研究領域・チームリーダー  
研究者番号：10322687