

令和元年6月6日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14129

研究課題名(和文) アップコンバージョン位相検出による周波数可変テラヘルツOCTの開発

研究課題名(英文) Development of swept-source optical coherence tomography using up-conversion detection

研究代表者

時実 悠 (Tokizane, Yu)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・研究員

研究者番号：80648931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はテラヘルツ波による非破壊三次元計測に向けた、テラヘルツ(THz)波アップコンバージョン技術を用いた位相検出技術による高感度周波数変調型THz-OCTの開発である。これまでに開発された光注入型テラヘルツパラメトリック光源(is-TPG)や差周波発生光源は、高強度かつ周波数可変範囲が広い光源であり、上記の目的に適する。is-TPGを用いて、THz-OCTの実証および周波数可変なアップコンバージョン技術の実証を行った。さらにOCTの高速化および感度向上に向けたis-TPGの高繰り返し化に成功した。以上により目的の技術の実現に向けた基礎技術を確立し技術の実現性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波による三次元非破壊検査は、貴重な古書籍や絵画の調査など、デジタルアーカイブ分野において有用である。しかしテラヘルツ波発生・検出技術の未熟さによる信号取得の難しさが問題となっている。アップコンバージョン技術を用いた位相検出技術による高感度周波数変調型THz-OCTの実現は、高出力な光源と高感度な検出技術を組み合わせる事でこの問題の解決に貢献する。本研究によって上記技術の基礎技術を確立したため、実現に向けた重要な進展が見られた。

研究成果の概要(英文)：The swept-source optical coherence tomography (OCT) using up-conversion detection with injection seeded terahertz (THz) parametric generator (is-TPG) is appropriate to enhance the signal in three-dimensional (3D) nondestructive imaging by THz-wave, because is-TPG is high-power and broadband tunable THz-wave source and up-conversion technique realizes highly sensitive THz-wave detector.

In this research, the demonstrations of the swept source THz-OCT system using is-TPG and tunable up-conversion system were independently achieved. Furthermore, high repetition rate is-TPG was also developed which is also crucial technologies for the enhance the measured signal in non-destructive imaging. From these results basic technologies were acquired to realize the THz-OCT system using is-TPG and up-conversion system.

研究分野：レーザー技術

キーワード：テラヘルツ波 非線形光学 OCT

1. 研究開始当初の背景

THz 波コヒーレンストモグラフィ (THz-OCT) はテラヘルツ (THz) 波の物質に対する透過性を活かした非侵襲断層計測であり、書籍や絵画の読み取りなどへの利用が提案されている。THz-OCT はデジタルアーカイブや考古学における強力なツールとなることが期待されている。THz-OCT の高速化、高解像度化の為に、光領域で実用化されている周波数可変型 OCT 技術を THz-OCT に取り込むことが望まれるが、高出力周波数可変 THz 波光源や高感度検出器が乏しいため信号検出が難しく発展が遅れている。

2. 研究の目的

本研究では、これらの課題に取り組むべく THz 波アップコンバージョン技術を用いた位相検出技術による、干渉計を用いない高感度周波数可変超型 THz-OCT を提案および実現に向けた技術開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的はテラヘルツ (THz) 波アップコンバージョン技術を用いた位相検出技術による高感度周波数可変型 THz-OCT を開発である。我々の開発した光注入型テラヘルツパラメトリック光源 (is-TPG) や DFG 光源は、高強度かつテラヘルツ周波数可変範囲が広い光源であり、上記の目的に適する。これを用いて、初めに (1) アップコンバージョンを用いない THz-OCT の検証を行い、次に (2) 周波数可変なアップコンバージョン技術の検証を行った。OCT の高速化および感度向上のため、(3) 光パラメトリック光源の高繰り返し化にも取り組んだ。これらによって、アップコンバージョン技術を用いた位相検出技術による THz-OCT の基礎技術開発に取り組んだ。

(1) アップコンバージョンを用いない光パラメトリック光源による周波数可変 THz-OCT の開発

初めに is-TPG 光源の THz-Oct への適用可能性を調べた。検証には単純な系を用いる事が望ましいためアップコンバージョン検出を用いないこととした。自己干渉計を構築し干渉信号のスペクトル測定を行う事で、THz-OCT に必要となるビーム奥行き方向の距離測定について検証した。

(2) 周波数可変アップコンバージョン検出技術の検証

アップコンバージョン検出技術は室温下で高感度な THz 波測定が可能である検出方法であり、THz-OCT の高感度化に適する。しかし LN 結晶を用いた場合、非同軸位相整合条件の制約によりテラヘルツ周波数毎に信号光の発生方向が変化するため、従来は測定器を移動させる必要があった。OCT 利用を考慮して検出用 LN 結晶と検出器の間で共焦点光学系を導入することで、検出器を固定した測定の可能性を検討した。高感度測定検証のため、テラヘルツブルズアイ構造の共鳴スペクトル測定を行った。テラヘルツブルズアイ構造は表面プラズモン共鳴を用いた THz 波の超集光可能なデバイスであり、透過スペクトルに共鳴特性を持つ。しかし共鳴周波数においても透過率は低い (1/1000 程度)、共鳴スペクトルの測定は容易ではない。アップコンバージョン測定によって微小な透過スペクトルが容易に測定できるようになれば、動作特性の解明が進む。

(3)高繰り返し光源の開発

OCT等のイメージング技術においては取得データ量が膨大なため高速・高信号雑音比での測定が重要である。このため森口祥聖研究員と供に、従来は100Hzであったis-TPGの繰り返し周波数の上昇にとり組んだ。100kHzのマイクロチップレーザーとNd:YVO4増幅器を用い、LN結晶の励起光損傷閾値を詳細に検討することで、高繰り返しテラヘルツ光源の開発を行った。

4. 研究成果

(1)アップコンバージョンを用いない光パラメトリック光源による周波数可変THz-OCTの開発

測定系を図1(a)に示す。光源に光注入型テラヘルツパラメトリック発生器(is-TPG)を用いて自己干渉系を構築し、パイロメーターで干渉スペクトルを測定した。測定サンプルとして、アルミ平面ミラー、シリコン基板を用いた。アルミ平面ミラーの位置に対する点広がり関数を図1(b)に示す。テラヘルツ周波数を1.2 THzから2.0 THzにおいて5GHz周波数刻みで変調し、スペクト干渉波形をフーリエ変換によって位置情報に変換した結果である。ピーク位置はサンプルと参照ミラーの光路差によく一致した。また厚さ560 μmのシリコン基板の測定において得られた干渉スペクトルを位置情報に変換した結果、分裂したピークを観測した。このピーク

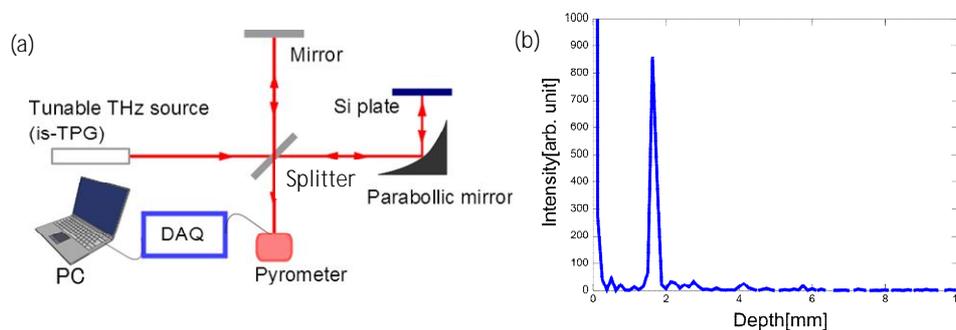


図1(a)測定系 (b)アルミ平面ミラーの位置に対する点広がり関数。

間距離はシリコン基板の屈折率を考慮した光学距離とよく一致した。よってシリコン基板の表面、裏面の位置を分解して測定できた。本光源のコヒーレンス長はおよそ数十 cmと比較的長く、原理的にはこの範囲の物体の反射信号が測定信号に重畳されるが、実験では主信号以外の信号は-10 dB以下に抑制されており、良好な信号雑音比が得られたといえる。

以上よりis-TGPを周波数可変OCTに適用することで、距離測定が可能であることが分かった。またTHz-OCTに必要な測定手法およびスペクトル可変範囲や測定時間を得ることができた。これらのパラメーターは原理的にアップコンバージョンを用いたTHz-OCTと同等である。よって、アップコンバージョンTHz-OCTの実現に必要な基礎技術を確立したといえる。

(2)周波数可変アップコンバージョン検出技術の検証

高強度なTHz波出力が可能な無機結晶LiNbO3(LN結晶)によるis-TPG系を用いた実験を行った。図2(a)に示すように共焦点光学系を導入し、周波数可変なアップコンバージョン系の構築を行った。測定結果を図2(b)示す。単一ピクセル型の近赤外光検出器を用い、検出器を固定したままTHz波を1.2 THzから2.1 THzで掃引した結果、近赤外アップコンバージョン信号によるスペクトル上にTHz帯の水蒸気吸収線が明確に測定された。これにより検出器を固定したまま、THz波の周波数可変な信号光が測定できたといえる。また、THz波の信号を減光しながら

ら測定した結果、本測定系は 50 dB 以上の測定範囲を持つことが分かった。

さらに構築した検出系の検証のため、共鳴を持つ THz プルズアイデバイスを用いて共鳴スペクトル測定を行った。図 2(c)に結果を示す。周波数 1.5 THz(波長 200 μm)に共鳴スペクトルが明確に観測された。これまでの液体ヘリウムボロメータを用いた測定結果と矛盾しない結果であった。よって共焦点系を利用する事で、室温下のアップコンバージョン測定によって検出器を固定したまま高い感度を持つスペクトル測定が可能となった。

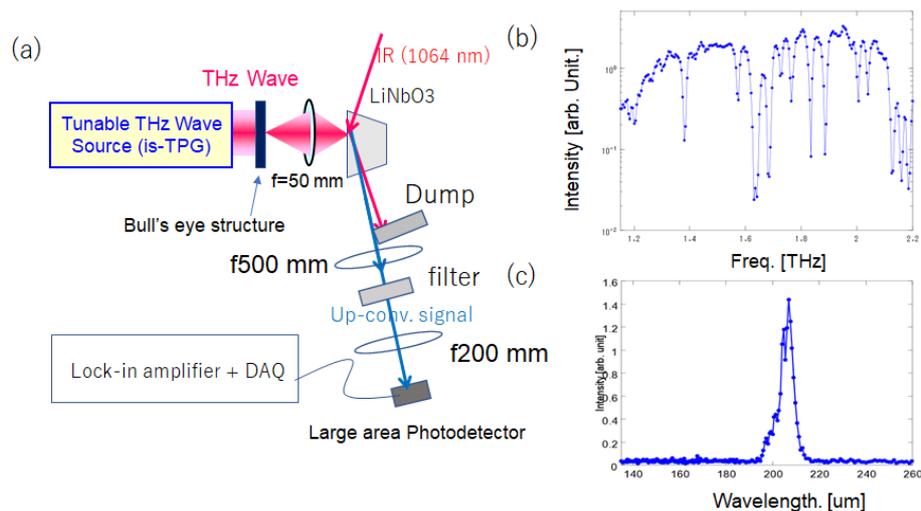


図 2(a)共焦点光学系(f500mm,f200mm レンズ対)を用いたアップコンバージョン測定系 (b)周波数可変 THz 波入力によるアップコンバージョン信号 (c)アップコンバージョン測定によるプルズアイ構造の透過スペクトル

さらに OCT の深さ分解能を得るため、周波数可変性の大きい有機非線形結晶 DAST を発生・検出に用いたアップコンバージョン系の構築も行ったが、サブ THz 領域ではアップコンバージョン信号が検出されなかった。DAST から発生するサブ THz 波の強度が不足しているためと考えられる。

(3)高繰り返し is-TPG 光源の開発

100kHz のマイクロチップレーザーと Nd:YVO4 増幅器を用い、LN 結晶の励起光による損傷閾値を詳細に検討したところ、フォトリフレクティブ効果による散乱とレーザー損傷を回避する入射ピークパワーおよび平均強度が存在することが分かった。この結果を基に is-TPG 光源の入射パワーの最適化を行い、100kHz 繰り返しにおいて THz 波出力平均 30 μW (ピークパワー 4 W)の出力を得た。周波数可変範囲は 0.9THz ~ 2.9THz である。また、この周波数可変テラヘルツ光源を用いて上記と同様の検証を行い、周波数可変 OCT に利用可能であることを明らかにした。本研究結果は森口祥聖研究員と協力して行った研究成果である。

以上によって、is-TPG 光源の周波数可変 OCT への利用可能性、検出器を固定したアップコンバージョン検出技術の周波数可変性が実証された。これによりアップコンバージョン検出を用いた周波数変調型 THz-OCT の実現に端緒をつけた。これらの技術とこれまで開発された位相検出技術と組み合わせる事で、干渉計を用いない THz-OCT の実現が可能である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. 時実 悠、四方 潤一、瀧田 佑馬、南出 泰亜、”斜入射テラヘルツ波を用いたブルズアイ構造共鳴ピークの角度依存分裂の観測” レーザー研究、第47巻 1号,52-55 (2019).査読有り
2. 森口 祥聖, 時実 悠, 縄田 耕二, 瀧田 佑馬, 永野 繁憲, 南出 泰亜, ”高繰り返しサブナノ秒レーザーに対するLiNbO3結晶の光損傷およびテラヘルツ波発生” レーザー研究、第47巻 1号42-46 (2019). 査読有り
3. Kouji Nawata, Yu Tokizane, Yuma Takida and Hiroaki Minamide, “Tunable Backward Terahertz-wave Parametric Oscillation,” Sci. Rep. vol. **9**, Article number: 726 (2019). 査読有り
4. Yoshikiyo Moriguchi, Yu Tokizane, Yuma Takida, Kouji Nawata, Taizo Eno, Shigenori Nagano, and Hiroaki Minamide, “High-average and high-peak output-power terahertz-wave generation by optical parametric down-conversion in MgO:LiNbO3,” Applied Physics Letters, **113**, pp. 121103 (2018). 査読有り
5. Zhengli Han, Seigo Ohno, Yu Tokizane, Kouji Nawata, Takashi Notake, Yuma Takida, and Hiroaki Minamide, “Off-resonance and in-resonance metamaterial design for a high-transmission terahertz-wave quarter-wave plate,” Optics Lett., **43**(12), 2977-2980 (2018). 査読有り
6. Zhengli Han, Seigo Ohno, Yu Tokizane, Kouji Nawata, Takashi Notake, Yuma Takida, and Hiroaki Minamide, “Thin terahertz-wave phase shifter by flexible film metamaterial with high transmission,” Opt. Express, **25**, Issue **25**, 31186 (2017). 査読有り

〔学会発表〕(計 5 件)

1. Y. Tokizane, J. Shikata, Y. Takida, and H. Minamide, “Measurement of coupling properties of free space terahertz-wave to surface plasmon resonator,” 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2018), We-POS-12, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan Sep. 12, (2018).
2. Kouji Nawata, Yu Tokizane, Yuma Takida, and Hiroaki Minamide, "Backward THz-wave parametric oscillation with tunability", Advanced Solid State Lasers Conference, AM2A.6, Nagoya, Japan. Oct. 2nd, (2017)
3. 時実 悠、四方 潤一、瀧田 佑馬、南出 泰亜: 表面プラズモン共振器デバイスにおけるテラヘルツ波結合に関する検討:第 78 回応用物理学会秋期学術講演会 2017 年 9 月
4. Y. Moriguchi, K. Nawata, Y. Takida, Y. Tokizane, S. Nagano, T. Eno, K. Kumagai, and H. Minamide “High-repetition-rate, widely tunable, injection-seeded terahertz-wave parametric generator,” 42nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017), WA2.1, Cancún, Mexico. Aug. 30, (2017).
5. Y. Tokizane, K. Nawata, Y. Takida, Z. Han, A.K. Dal Bosco, M. Koyama, T. Notake, H. Minamide, "DAST-difference frequency THz-wave generation with wide tuning range from 0.2 to 3 THz", The 24th Congress of the International Commission for Optics, M1H-02, Tokyo, Japan. Aug. 21, (2017)

〔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：
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：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：南出 泰亜
ローマ字氏名：Hiroaki Minamide

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。