

令和 3 年 5 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01906

研究課題名（和文）光波とミリ波を周波数接続するバウンダリーフォトリニクス技術の開発

研究課題名（英文）Development of backward terahertz-wave parametric oscillator for boundary photonics bridging the frequency gap between millimeter and optical waves

研究代表者

縄田 耕二 (Kouji, nawata)

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：90586405

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の基礎研究を行い、高効率・高出力なカスケードサブテラヘルツ波発生を行った。発振現象の入出力特性を詳しく検証し、高出力化のためには発振閾値の低下と量子変換効率向上が重要だと考え、光注入によるカスケード後進波テラヘルツ波パラメトリック発振を提案した。実験の結果、テラヘルツ波出力エネルギーを100倍以上高めることに成功し、中心周波数0.3 THzで100Wを超える尖頭出力を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブテラヘルツ波は、様々な物質を透過する電波的な特徴とレーザー光のように直進する光波的な特徴を併せ持つため、外から見るができない内部を非破壊に検査する電磁波として期待されている。本研究の後進波テラヘルツ波パラメトリック発振器は小型で機械的に安定であり、これまで難しかった実験室外でのテラヘルツ波非破壊検査に適した特徴を有している。本成果は、インフラメンテナンス検査など社会の安全安心につながる非破壊検査応用に資すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We investigated backward terahertz-wave parametric oscillation (BW-TPO) and demonstrated efficient THz-wave generation via cascading wavelength conversion. The comprehensive analysis of input-output characteristics of BW-TPO showed the issues on high oscillation threshold intensity and its photon-conversion efficiency. We applied injection-seeding to BW-TPO for an idler wave to achieve threshold reduction and efficient photon-conversion, resulting demonstration of cascaded BW-TPO. As a result, output THz-wave energy enhanced over 100 times from previous results, corresponding to high-peak power over 100 W at the frequency of 0.3 THz.

研究分野：非線形光学

キーワード：テラヘルツ波発生 バックワード光パラメトリック発振 カスケード過程 光注入 非破壊検査 非破壊イメージング

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

サブテラヘルツ周波数領域はエレクトロニクスとフォトニクスの境界領域であり電子デバイス技術の開発が目覚ましい進歩を遂げている。高精細映像の無圧縮無線伝送などへの活用をはじめとした応用により開拓される周波数領域であり、様々な高周波デバイスの開発が一層進むことが期待される周波数領域である。一方で、ミリ波デバイスとフォトニクスデバイスを接続する技術的な学理がいまだに十分ではない。なぜならば開発途上のデバイスには大きな損失係数がつきものであり、評価するための高出力かつ広帯域周波数可変性を両立する光源が存在しないからである。例えば電子デバイスでは近年高周波化してきた THz-RTD やシリコンデバイスなどがあるが周波数可変領域は中心周波数の 10%程度に留まり、その出力も μW のオーダーである。一方、フォトニクスデバイスとしては UTC-PD は広帯域周波数可変であるが、ビート周波数を作るために 2 台のレーザーが必要であることや W 以上の高出力化は難しいのが現状である。また非線形光学に基づくフォトニクス技術からみると極限長波長領域であり、超短パルス光源を用いたモノサイクルテラヘルツ波光源は広帯域周波数成分を含んでおり、周波数特性を直接計測することに向いていない。また、ニオブ酸リチウム結晶を用いた光注入パラメトリック発生では光パラメトリック利得の差から注入波長への利得集中は原理的に困難である。

以上のような学術的背景により、広帯域周波数可変性と高出力を両立する光源が存在しないため、ミリ波デバイスとフォトニクスデバイスを接続する技術的な学理がいまだに十分ではない。本研究は必要な光源の課題をバウンダリーフォトニクスと位置づけ申請者独自のフォトニクス技術を用いて解決する。本研究課題で提案する後進波パラメトリック発振は他にない独創的な手法であり、極限長波長領域発生の学理探求と後進波パラメトリック発振の学術的深化による高性能化の余地は大きい。将来、境界周波数領域を網羅する周波数可変性と 1kW を超える高出力発生を期待できる。加えて、結晶と小型単色近赤外レーザーだけでテラヘルツ波発振可能であり、小型・堅牢な光源となる。材料開発やデバイス評価のために被測定対象の場所へ光源を送って測定することが加速的なデバイス開発のために今後ますます重要になる。周波数境界領域を開拓するバウンダリーフォトニクスの開発によってミリ波デバイスとフォトニクスデバイスの境界領域を接続する技術的な学理創出と今後の周波数境界領域における材料開発やデバイス評価などの基盤技術創出を目指す。

2. 研究の目的

本研究課題では従来の非線形波長変換技術では困難な極限長波長領域へフォトニクス技術を拡張し、周波数境界領域を網羅する周波数可変性を有する高出力光源の実現を目的とする。この周波数領域は極限的に長波長であるため、従来の光注入型光パラメトリック発生技術の延長技術ではシステムの大型化や非線形結晶自体のパラメトリック利得の相対的な低下が起き、高効率な波長変換は困難である。利得問題の解決策の一つとして疑似位相整合デバイスによって光パラメトリック利得を設計波長へ集中させる手法があるが、設計波長でのみ動作し波長可変性との両立は困難であった。

申請者は最近新しい発見として後進波光パラメトリック発振に初めて成功し、極限長波長領域における周波数可変性を明らかにしてきた。後進波光パラメトリック発振の原理は、非線形光学結晶にフィードバック効果を内在させることによる共振器構造を持たない光パラメトリック発振器である。共振器構造を持たないことによって小型化が可能であり、アライメントフリーで堅牢な光パラメトリック発振器が実現できると期待されている。基礎理論提案は非線形光学の初期である 1966 年に Dr. S. E. Harris によって提案された。一方で、逆方向に伝搬する光の相互作用による光パラメトリック発振であるため、本質的に大きな運動量不整合を補償する必要があり、疑似位相整合デバイスを用いてさえ光波領域でのわずかな報告例しかなかった。テラヘルツ波領域では、理論計算の報告はあったものの実験的に実証されていなかった。

本研究では申請者が世界で初めて発振に成功した後進波光パラメトリック発振によるテラヘルツ波発振器を用いて、従来の非線形波長変換技術では困難であった周波数境界領域を開拓するフォトニクス技術による高出力光源の開発を目指す。

3. 研究の方法

独自のサブナノ秒パルス近赤外励起光源を用いて周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の性能を引き出すことによって、後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の諸特性を調べ、得られた知見を活かして高出力化を目指す。ニオブ酸リチウム結晶を用いたテラヘルツ波パラメトリック発生において、これまでの研究で誘導ブリルアン散乱がテラヘルツ波発振のための誘導ラマン

散乱を阻害することを発見してきた。音響フォノンである誘導ブリルアン散乱の抑制には励起時間を短縮し、ブリルアン散乱利得の立ち上がり時間より短くすることが有効だと実験的に判明している。一方で、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を用いた後進波テラヘルツ波パラメトリック発振は世界で初めての実証例であり、その潜在的な諸特性はまだ未解明である。

本研究では独自のサブナノ秒パルス光源を用いて後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の特性を調べ、フォトニクス領域からみた最長波長領域にあたるサブテラヘルツ領域を開拓する。非線形光学結晶には、後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の位相整合条件を満たし、テラヘルツ波発生性能指数の高い周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を用いる。特に、応用利用に最も重要と考えられる高効率・高出力なテラヘルツ波発生を目指した基礎研究を行う。そこで、研究期間で、(1) 後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性を評価し、得られた結果から(2) 光注入型後進波テラヘルツ波パラメトリック発振を行った。さらなる高出力化に向けて、(3) カスケード波長変換の利用を提案し、実験を行った。

4. 研究成果

(1) 後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性

励起光源としてパルス幅約 0.64ns, パルスエネルギー約 10mJ, 波長 1064nm のレーザー MOPA システムを用いて実験を行った。周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶は分極反転周期 53 μ m, 斜周期角度 67 度を用いた。結晶サイズは長さ 50mm, 幅 5mm, 厚さ 1mm だった。励起光ビームサイズは、結晶に入射可能な大きさに調整するため、レンズを用いた共焦点光学系を用いて約 0.8mm の半値全幅にした。

後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性結果を図 1 に示す。励起光強度が約 1.6GW/cm² に達すると後進波テラヘルツ波パラメトリック発振のアイドラー光が最初に確認できた。アイドラー光のエネルギーは励起光強度の増加に従って線形に増えており、明確な閾値があるとわかった。同時に発生するテラヘルツ波は励起光強度約 2GW/cm² から確認できた。アイドラー光との信号確認時の励起光強度差はテラヘルツ波検出器の低い検出感度によるものと考えられる。アイドラー光の波長を光スペクトラムアナライザで測定したところ中心波長約 1065.5nm, 半値全幅 0.01nm であった。励起光波長との周波数差は約 300GHz であり、バルクのニオブ酸リチウム結晶では発生の難しいサブテラヘルツ波周波数において発振させることに成功した。

また、高い励起光強度下においては同時に満たす別の位相整合条件によるテラヘルツ波パラメトリック発生が確認できた。さらに励起光強度を高めると、アイドラー光が励起光として次の後進波テラヘルツ波パラメトリック発振を引き起こすカスケード波長変換が起きることも明らかにした。高強度励起下において、後進波テラヘルツ波パラメトリック発振だけでなく前方テラヘルツ波パラメトリック発生も同時に起きており、波長変換効率が低いことを実験的に確認した。

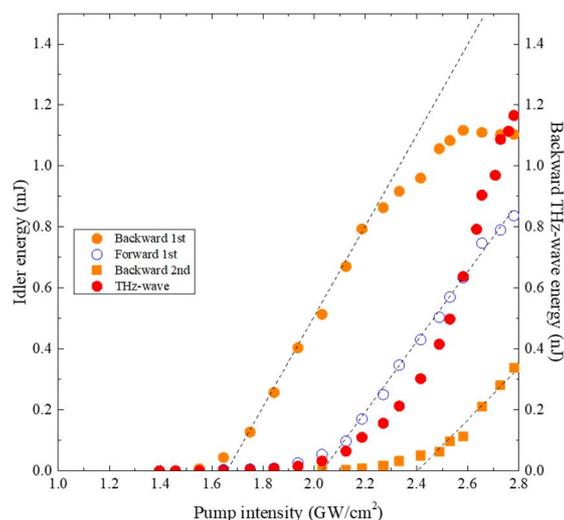


図 1. 後進テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性例

(2) 光注入型後進波テラヘルツ波パラメトリック発振

高強度励起下において後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の変換効率を高めるためには、テラヘルツ波パラメトリック利得を集中させ、他の非線形波長変換を抑制する必要があると考えられる。そこで、これまでの光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生の知見を活かし、後進波テラヘルツ波パラメトリック発振にアイドラー光へ光注入を初めて行った。光注入は外部共振器型半導体レーザーの連続波 (CW) 出力を光ファイバ増幅器で増幅した後、斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に励起光と同時に入射した。注入光の波長と角度は位相整合条件を満たすように設定した。注入光パワーは光フ

アイバ出力で480mWであった。また、この実験ではパルス幅約0.4nsの光源を用いた。

光注入型後進テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性を図2に示す。光注入によって後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の発振閾値は約1/3まで低下させることに成功した。これは光パラメトリック蛍光の真空場に注入光を入れたことで、光パラメトリック利得を集中させることができたことによる。発振閾値の低下によってテラヘルツ波出力も向上し、テラヘルツ波出力の向上も確認できた。結果として、前方テラヘルツ波パラメトリック発生を抑制することもできた。

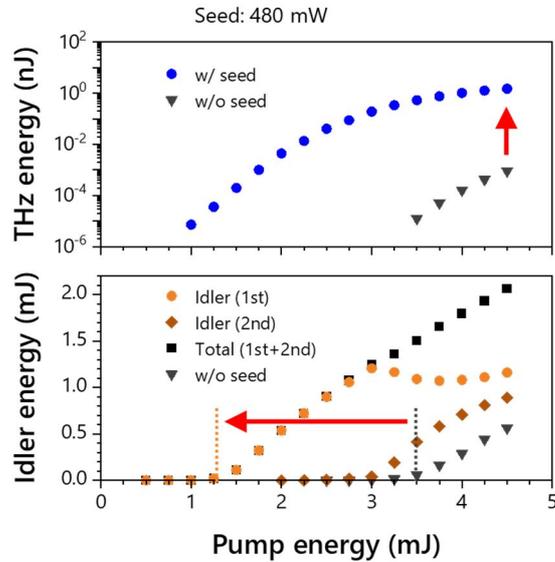


図2. 光注入型後進テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性例

(3) カスケード波長変換による高出力化

カスケード波長変換は、発生したアイドラー光を励起光として再び波長変換させることによって、単一励起光子から複数のテラヘルツ光子を発生することを可能にし、マンリー・ローの関係による量子変換限界を原理的に超える潜在能力を有する。後進波テラヘルツ波パラメトリック発振において効果的なカスケード波長変換を促すため、相互作用場の増大を図った。具体的にはパルス幅を0.84ns(空間長で約20cm)と周期分極反転ニオブ酸リチウムの物理長より4倍長くした。さらに、光注入を同時に行うことによって発振閾値の低下と前方テラヘルツ波パラメトリック発生の抑制を行った。

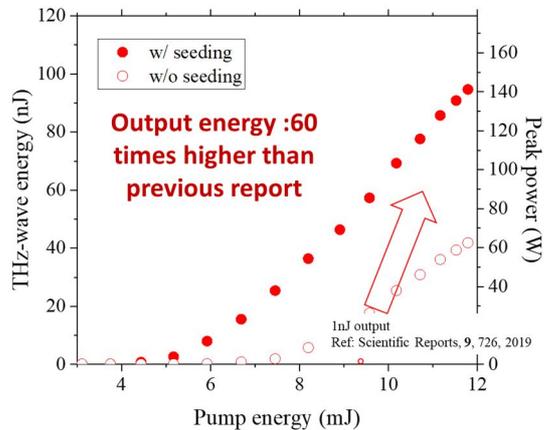


図3. カスケード波長変換を利用した光注入型後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の入出力特性例

図3にカスケード波長変換を利用したテラヘルツ波出力の結果を示す。比較対象として、図1に示した研究開始当初のテラヘルツ波出力(Scientific Reports, 9, 726, 2019)も同時に示している。カスケード波長変換を利用した結果、テラヘルツ波出力エネルギーは60倍以上増大した。さらに、ニオブ酸リチウム結晶から出力されたテラヘルツ波を励起光の光軸から軸外しするためのテラヘルツ波分離ミラーを独自に開発し、最終的に100倍以上のテラヘルツ波出力エネルギーを得ることに成功した。

本研究では、後進波テラヘルツ波パラメトリック発振の性能を向上し、結果として100倍以上の高出力化を達成した。フォトニクス領域から見た極限長波長領域での高い波長変換効率を実現し、従来の非線形波長変換手法では達成困難な高出力発生に成功している。100Wを超える尖頭出力はジャイロトロン級であり、室温動作で高出力なサブテラヘルツ波光源といえる。また、共振器構造の無い小型安定なテラヘルツ波発振器は非破壊検査などの応用にも適していると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takida Yuma, Nawata Kouji, Minamide Hiroaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Injection-seeded backward terahertz-wave parametric oscillator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 061301 ~ 061301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0007306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minamide Hiroaki, Nawata Kouji, Takida Yuma	4. 巻 11499
2. 論文標題 Leading-edge terahertz-wave parametric sources and their applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11499, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI	6. 最初と最後の頁 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2568479	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nawata Kouji, Tokizane Yu, Takida Yuma, Minamide Hiroaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Tunable Backward Terahertz-wave Parametric Oscillation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 726
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-018-37068-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kouji Nawata, Yuma Takida, Takashi Notake, and Hiroaki Minamide
2. 発表標題 Palmtop, tunable backward terahertz-wave parametric oscillator
3. 学会等名 The 9th International Workshop on Terahertz Technology and Applications（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nawata, Y. Takida, Y. Tokizane, T. Notake, Z. Han, and H. Minamide
2. 発表標題 Security screening system based on spectral detection of gas molecules by tunable terahertz-wave
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Minamide, Kouji Nawata, and Yuma Takida
2. 発表標題 Security screening system with an injection-seeded terahertz-wave parametric generator
3. 学会等名 The 7th Laser Ignition and Giant-microphotonics Conference 2019 (LIC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 縄田耕二, 南出泰亜
2. 発表標題 後進波光パラメトリック発振による光 - テラヘルツ波波長変換
3. 学会等名 第39回レーザー学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouji Nawata, Hiroaki Minamide
2. 発表標題 Cavityless terahertz-wave parametric oscillator using slant-stripe-type periodically poled lithium niobate
3. 学会等名 5th RIKEN-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nawata, Y. Tokizane, Y. Takida, T. Notake, Z. Han, A. Karsaklian Dal Bosco, M. Koyama, H. Minamide
2. 発表標題 A mirrorless terahertz-wave parametric oscillator,
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nawata, Y. Tokizane, Y. Takida, and H. Minamide
2. 発表標題 Tunable backward THz-wave parametric oscillation using a periodically poled lithium niobate,
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO:2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関