

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：31308

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03747

研究課題名（和文）テラヘルツ光の量子状態生成と量子計測応用の開拓

研究課題名（英文）Quantum State Generation of THz-Light and Exploration of Quantum Measurement Applications

研究代表者

野竹 孝志（NOTAKE, TAKASHI）

石巻専修大学・理工学部・准教授

研究者番号：70413995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年の量子研究は究極の計測の探求を進めており、非線形光学効果を用いて光を量子状態まで拡張する事で、古典的計測の限界を突破できる事が実証され始めている。

テラヘルツ波の周波数領域では、光子エネルギーが室温熱揺らぎに相当する程微弱なため、光子検出は原理的に困難である。この困難を克服する為、我々は後進THz波パラメトリック発振過程を用いた超高感度THz波光子検出に挑戦した。2つの独立したPPLN結晶を用いる事で、光子エネルギーが1000倍も異なる量子変換を実現し、300GHzのサブテラヘルツ電磁波光子を波長1umの近赤外光子へと高効率に変換する事で、光子レベルのテラヘルツ電磁波検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光の量子力学的性質を利用した研究は、光子エネルギーの大きな可視光や近赤外光領域においてのみ進展してきた。この理由は可視光や近赤外光であれば光子エネルギーが大きく、半導体検出器などで容易に光子レベルの超高感度検出が可能となるためである。

可視光領域に比べて光子エネルギーが1000分の1程度のテラヘルツ電磁波に対する量子研究は、光子検出の困難さから進展が非常に立ち遅れている。本研究において、後進パラメトリック過程によりテラヘルツ電磁波を可視光へと高効率に変換することで光子レベルのサブテラヘルツ電磁波検出が可能である事が実証でき、テラヘルツ光子の量子的理解の深化が今後大いに進展する事が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Recent quantum research has advanced the quest for the ultimate measurement and has begun to demonstrate that the limits of classical measurement can be broken by extending the interference of light using non-linear optical effects to quantum states.

In the terahertz frequency range, photon detection is in principle difficult because the photon energy is so weak that it corresponds to room temperature thermal fluctuations. To overcome this difficulty, we have attempted to detect ultra-sensitive THz-wave photons using a backward THz-wave parametric oscillation process. Two independent PPLN crystals are used to achieve a quantum conversion with photon energies differing by a factor of 1000. The highly efficient conversion of 300 GHz sub-THz photons into near-infrared photons with a wavelength of 1 um has led to successful detection of terahertz electromagnetic waves at the photon level.

研究分野：テラヘルツ光学

キーワード：テラヘルツ電磁波 量子

1. 研究開始当初の背景

近年の量子研究は、究極的な計測の探求を進めており、非線形光学効果を用いて光の量子状態を創り出し巧みに制御する事で、古典的計測の限界を突破できる事が実証され始めている。実際に2014年、Lemos(1)らは、2つの非線形光学過程を用いた量子干渉イメージングを実現した。具体的には、非線形光学結晶による自発パラメトリック・ダウンコンバージョンにより異なる波長のシグナル光子とアイドラー光子を発生させ、アイドラー光子を撮像対象に照射し、シグナル光子とアイドラー光子の量子相関による量子干渉によりシグナル光子のみを検出することで、実際には検出しないアイドラー光子の波長領域である近赤外領域でのイメージングを実現した。この方法は、原理的に半導体検出器による高感度化が困難なテラヘルツ (THz) 周波数領域の測定に非常に有効で有望な手法であり、赤外光領域への拡張を含めて注目されている(2-4)。これまでの研究では、量子相関の発生において単一光子性が十分に保証される低ゲイン領域で行われてきた。しかし、Kolobovら(5)は、2つの非線形光学結晶へのポンプ光の強度比を適切に制御することで、高ゲイン領域でも高い visibility を持つ量子干渉が実現できることを示し、さらなる研究を促している。

また、2つの線形ビームスプリッターを用いた従来のマッハツェンダー型 SU(2)干渉計では、位相測定誤差は $1/\sqrt{N}$ (N は光子の総数) である。この限界はショットノイズによって決まり、一般に標準量子限界と呼ばれている。しかし、2つの非線形光学プロセスを用いて構築された新しい SU(1,1)量子干渉計は、量子相関光子対を利用することで、位相測定の誤差をハイゼンベルグ限界として知られる $1/N$ に低減することが可能で、次世代の量子センシング応用につながると期待されている。しかしながら、これら光の量子力学的性質を利用した応用研究は、単一光子レベルでの検出が可能な可視光・近赤外光領域のみでしか進展していないのが現状である。

2. 研究の目的

テラヘルツ電磁波の周波数領域では光子エネルギーが室温熱揺らぎエネルギーに相当するため背景放射ノイズの影響などにより光子レベルの超高感度検出は現在のところ困難である。この困難を克服するために我々は、2つの非線形後進テラヘルツ波パラメトリック発振プロセスを用いた超超高感度テラヘルツ波検出に取り組む。このプロセスでは、フォノン・ポラリトンを介した非線形光学波動混合により、2つの光波 (ポンプとアイドラー) とサブテラヘルツ周波数電磁波 (シグナル) の間の3波のコヒーレントな重ね合わせが可能になる。特に2つの光波とサブテラヘルツ波が逆方向に進行しながら相互作用するため、すべての光子のコヒーレント波の重ね合わせは空間的・時間的に非常に限定され、高い量子相関により真空ノイズから高度に分離できる可能性があり、信号対雑音比 (SNR) の向上と超高感度検出が期待できる。この結果を基に、非線形量子相関を利用したサブテラヘルツ光子の超高感度検出技術を応用し、今後のテラヘルツ電磁波を利用した SU(1,1)型干渉計開発のための基礎を築く。

3. 研究の方法

図1に示すように、2つの独立した周期分極二オプ酸リチウム結晶 (PPLN1 と PPLN2) を、単一縦モードで波長 1064.4nm の共通の Nd: YAG レーザー (パルス幅 0.9 ns、パルスエネルギー 15 mJ、発振波長 1064.4 nm) によって光学的に励起する。サブナノ秒のレーザーパルスは PPLN 結晶の誘導ブリルアン散乱を抑制するのに極めて有効である。また、レーザー光のスペクトル幅の測定値は 0.01nm 以下であり、これは我々の光スペクトラムアナライザーの波長分解能の限界に相当するレベルである

PPLN1 では、アイドラー光子とシグナル光子からなるダウンコンバートされた光子対が、それぞれ近赤外光 (アイドラー光子) およびサブテラヘルツ電磁波 (シグナル光子) の周波数領域で生成される。その後、シグナル光子のみがポンプ光子とともに PPLN2 結晶に入射される。PPLN2 結晶内では、サブテラヘルツ光子が量子相関を引き起こし、新しいアイドラー光子が非線形後進パラメトリック過程によって効果的に量子変換され生成される。そして、アイドラー光子は、PPLN2 の後段に設置されたバルクの二オプ酸リチウム (LN) 結晶によって、さらにノイズレスにパラメトリック増幅され、このアイドラー光子を市販の高性能半導体検出器を用いて検出することにより、間接的な室温での超高感度サブテラヘルツ光子検出が実現できる。図1で

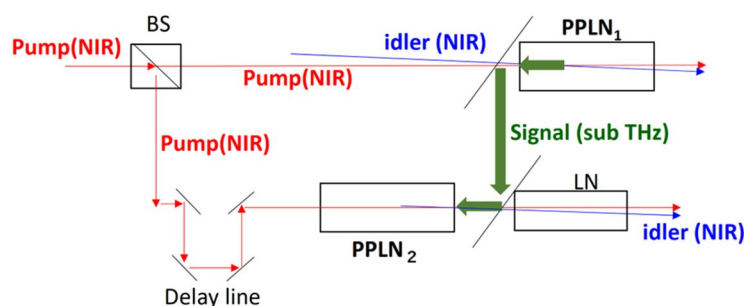


図1. 2つの後進パラメトリック過程を利用した検出系

は、ポンプビームを赤線で表し、その偏光は紙面に垂直である。PPLN1 のテラヘルツ波発生系では、テラヘルツ波光子を効率よく発生させるために、青線で表されるシーディングビームを入射する。すなわち、パルスポンプ光と CW シード光を PPLN1 結晶に照射し、後方 THz 波パラメトリックプロセスの結果としてサブテラヘルツ波が発振する。図 1 の青線はアイドラー光も示している。THz 光子の発振周波数は、ポンプの k ベクトルと PPLN1 の周期的に分極反転されたグレーティングの k ベクトルとの間の角度に依存する。生成過程では、ポンプパルスエネルギー 6mJ、入射 CW シード光の平均パワー 500mW のとき、周波数 308GHz、パルスエネルギー 10nJ のサブテラヘルツ波が得られる。PPLN1 から後方波として放出されたサブテラヘルツ光子は、PPLN1 の前面に配置された高屈折率ニオブ酸リチウム (LN) ウェーハで 90 度反射される。ここで、反射防止膜は 1064nm 付近の波長用に作られているため、ポンプ光とシーディング光は LN ウェーハを通過できる。反射されたサブテラヘルツ光子は、同じ AR コーティングを施した 2 枚目の LN ウェーハで再度反射され、サブテラヘルツ光子の光路を 90 度変え、図 1 に示すように、裏面から PPLN2 結晶に入射され、アイドラー光子に変換される。ここで、凸レンズを用いてサブ THz 波を十分に収束させ、 $1 \times 5\text{mm}^2$ という小さな断面を持つ PPLN2 結晶に効率よく結合させる必要がある。PPLN2 に入射するポンプ光とサブテラヘルツ波はともにパルス幅約 0.9ns 程度の短パルス光であるため、ポンプ光の経路上に設置した遅延ステージを用いて、両者の時間的タイミングを正確に合わせる必要がある。さらに、長さ 50 mm のバルク LN 結晶を PPLN2 の後方に配置し、変換されたアイドラー光と PPLN2 を透過したポンプ光を入射した。バルク LN 結晶は後進テラヘルツ波のパラメトリック位相整合を満たさないため、アップコンバートされたアイドラー光のみを対象とした従来のパラメトリック増幅では、アイドラー光子の効率的な検出が期待できない。さらに、PPLN1 で発生するアイドラー光の波長が、ポンプビームによって PPLN2 で発生できる波長と一致しなければ、テラヘルツ光子からアイドラー光子への変換が実現できない。アイドラー光の波長はポンプ光の波長に非常に近いため、ポンプ光とアイドラー光が結晶の外側でなす角度は非常に小さい。その上、強いポンプ光の一部は PPLN 結晶内部で散乱し、アイドラー光の光路と一部重なる。このようなノイズの多いポンプ光からアイドラー光を分離するために、回折格子を用いて分離し、最終的に、アバランシェ・フォトダイオードを使ってアイドラー光だけを検出する。これらの課題を克服することで、後方テラヘルツパラメトリック発振プロセスを用いた高感度サブテラヘルツ光子検出に成功した。

4. 研究成果

図 2 は、入力サブテラヘルツ光子数の関数として、変換されたアイドラー光がノイズに埋もれるまで検出される検出限界の結果を示している。測定では、まず入力されたサブテラヘルツ光子のパルスエネルギーを、テラヘルツ光子用に校正されたパワーメーターを用いて正確に評価した。次に、308GHz のサブテラヘルツ波に対して透過率 23%の厚さ 1mm のガラス板を挿入し、PPLN2 に入射するサブテラヘルツ光子数を段階的に減衰させた。アイドラー光子はシリコンアバランシェフォトダイオード検出器で検出され、図 2 に示すように、検出されたアイドラー光の信号強度は、入射するサブテラヘルツ光子の数が減少するにつれて減少する。検出限界を決定する主なノイズは、強いポンプ光子の散乱光と、PPLN2 にテラヘルツ光子を入射せずにポンプ光子によって生成されたアイドラー光子である。ポンプ光の光量を減らすことは、これらのノイズ強度を低減するのに有効であるが、同時に非線形光学効果による変換効率も低下する。したがって、サブテラヘルツ検出には最適なポンプ光強度が存在する。実験では、5.5mJ のポンプ・パルス・エネルギーが最良の結果をもたらし、検出アイドラー光強度は、サブテラヘルツ光子の入射数が約 10^5 レベルに達したときに最終的にノイズ・レベルに埋もれる。

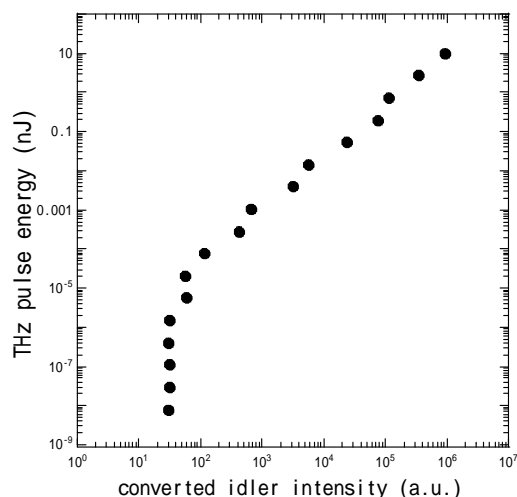


図 2 . 後進パラメトリック過程を用いたテラヘルツ光子変換検出

参考文献

1. G. B. Lemos et al., Nature vol.512, 409-412 (2014).
2. D. A. Kalashnikov et al., Nature Photonics vol.10 96-102 (2016).
3. Y. Mukai et al., Opt. Express 30, 22624-22636 (2022).
4. M. Kutas et al., Sci. Adv. 2020; 6 : eaaz8065
5. M. I. Kolobov., J. Opt. 19, 054003 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Y. Takida, K. Nawata, T. Notake, T. Otsuji, and H. Minamide	4. 巻 30
2. 論文標題 Optical up-conversion based cross-correlation for characterization of sub-nanosecond terahertz-wave pulses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Opt. Express	6. 最初と最後の頁 11217-11227
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.452310	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 縄田 耕二, 瀧田 佑馬, 野竹 孝志, 南出 泰亜	4. 巻 91
2. 論文標題 バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振におけるカスケード波長変換	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 32-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.91.1_32	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 南出泰亜、縄田耕二、瀧田佑馬、野竹孝志	4. 巻 50
2. 論文標題 バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の研究と非破壊検査応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 172-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 T. Notake, T. Iyoda, T. Arikawa, K. Tanaka, C. Otani & H. Minamide	4. 巻 11, 3310
2. 論文標題 Dynamical visualization of anisotropic electromagnetic reemissions from a single metal microhelix at THz frequencies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-80510-y	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Takashi Notake, Michihiro Kitanaka, Kouji Nawata, Yuma Takida, Hiroaki Minamide
2. 発表標題 Ultra-sensitive detection of sub-THz electromagnetic-waves using backward-wave parametric process
3. 学会等名 The 11th Advanced Lasers and Photon Sources (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuma Takida, Kouji Nawata, Takashi Notake, Taiichi Otsuji, Hiroaki Minamide,
2. 発表標題 Optical Up-Conversion-Based Cross-Correlation of Terahertz-Wave Pulses
3. 学会等名 CLEO2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuma Takida, Kouji Nawata, Takashi Notake, Hiroaki Minamide,
2. 発表標題 Injection-seeded backward terahertz-wave parametric oscillators at 0.3 and 0.5 THz bands for nondestructive imaging applications
3. 学会等名 SPIE Photonics Europe 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouji Nawata, Yuma Takida, Takashi Notake, Hiroaki Minamide
2. 発表標題 High-dynamic-range nondestructive testing promoted by 200 W peak-power backward terahertz-wave parametric oscillator
3. 学会等名 CLEO-PR 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西田 美緒、野竹 孝志、廣澤 賢一、大畠 伸夫、瀧田 佑馬、南出 泰亜
2. 発表標題 1.5 μm 帯レーザを用いた高繰り返し光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧田 佑馬、縄田 耕二、野竹 孝志、WANG Yuye、南出 泰亜
2. 発表標題 KTP結晶を用いたサブナノ秒レーザー励起 テラヘルツ波パラメトリック発生
3. 学会等名 The 69th JSAP Spring Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野竹孝志 北中道大 縄田耕二 瀧田佑馬 南出泰亜
2. 発表標題 後進波パラメトリック過程を用いた300 GHz帯電磁波の超高感度検出
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Notake, Michihiro Kitanaka, Kouji Nawata, Yuma Takida, Hiroaki Minamide
2. 発表標題 Ultra-sensitive detection of sub-THz electromagnetic-waves using backward-wave parametric process
3. 学会等名 The 11th Advanced Lasers and Photon Sources (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 縄田 耕二, 瀧田 佑馬, 野竹 孝志, 南出 泰亜	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 317
3. 書名 テラヘルツ波産業創成の課題と展望 テラヘルツ波パラメトリック光源を用いたリアルタイム危険ガス検知	

〔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
---------	---------