

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560043

研究課題名（和文） 量子相関の波長変換技術に関する研究

研究課題名（英文） Study on the wavelength changing system of quantum correlation

研究代表者

笠井 克幸（KASAI KATSUYUKI）

独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究センターナノ ICT グループ・主任研究員

研究者番号：90359084

研究成果の概要（和文）：光の非古典的性質である量子相関は、量子情報通信技術の分野において重要なリソースである。この量子相関を有する光の波長を可変化する技術は、応用上において重要な課題である。光パラメトリック発振器から発生させることができる量子相関光子対ビームは、これまで波長の可変性が困難であった。本研究では、光子対ビームが有する光強度量子相関を波長変換、チューナブル化するための基盤技術を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：The quantum correlation of nonclassical light is an important resource in the field of quantum information and communications technology. Development of the wavelength changing system of the quantum correlation is an important subject on application. Wavelength changing and tunable systems of quantum-correlated twin beams generated from an optical parametric oscillator have been studied and developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：光制御、量子相関、光パラメトリック発振器、光子対ビーム

1. 研究開始当初の背景

近年、量子情報通信技術の分野の研究が盛んになってきており、急速な発展を遂げつつある。この量子情報通信技術の研究は、量子力学と情報通信技術を融合させ、新たな情報通信パラダイムを構築しようとするもので

ある。この量子情報通信技術の研究分野では、量子状態を制御した非古典的な光が光源として用いられる。例えば、量子雑音を抑圧した光であるスクイズド光を用いて量子エンタングルメントのような相関を持つ光を発生させ、量子状態のテレポーテーションを

行うことができる。さらに、計測の分野では、スクイズド光を用いてショットノイズ限界を打ち破ることができる。我々のグループでは、光強度に量子相関を持つ光子対ビームに着目し研究を行ってきた。この量子相関光子対ビームも量子情報通信における量子プロトコルを実現するための重要なリソースである。この量子相関光子対ビームは、光パラメトリック発振器を用いて発生させることができ、仏国 Kastler-Brossel 研究所、中国 Shanxi 大学、米国 MIT、伊国 Napoli 大学で安定な発生に成功している。日本国内においては、唯一、本研究代表者のグループで安定な発生に成功している。この量子相関光子対ビームを用いて、ショットノイズ限界を超える高感度計測を行ったり、量子通信のための量子チャンネルを構成したりすることが可能である。これらのスクイズド光や量子相関光子対ビームの連続波 (CW) 発生には非線形結晶を用いた光パラメトリック発振器が用いられているが、発生が可能な光の波長は非線形結晶とレーザー光の組み合わせによる位相整合条件のために限られてくる。現在のところ主として用いられている組み合わせは、YAG レーザーと KTP 結晶 (波長 1064nm)、YAP レーザー又は半導体レーザーと KTP 結晶 (波長 1080nm)、Ti:Sapphire レーザーと KNbO3 結晶 (波長 855nm 近傍) である。このような非古典的な光の応用としては、高感度光計測、原子・分子などの高感度分光、量子メモリーへの発展が期待される原子との相互作用の研究、あるいは、量子通信等が考えられる。様々な応用を考えた場合、量子状態の波長変換技術等を用いて波長をチューナブル化する技術が必要となってくる。また、量子暗号の研究分野では通信波長帯 (1550nm) の単一光子を量子効率の高い検出器が得られる 630nm 帯へ波長変換する研究などが、非線形結晶内の和周波混合を用いて行われている。量子相関を持つ光子対の波長変換に関しては、1992 年に米国 Northwestern 大学の Kumar のグループによって、パルス光を用いた実験が報告されている。この実験では、3 dB の光強度量子相関を持つパルス光の光子対の片方のパルス光が非線形結晶内で波長変換された後、光子対である相方のパルス光との間に 1.5 dB の光強度量子相関が観測された。CW の非古典光の波長変換に関しては、より高度な技術を要するため、これまでのところ実験の報告はない。また、中国 Shanxi 大学のグループが関連の研究を始めており、光共振器内の非線形結晶を用いた和周波混合による量子エンタングルメントの波長変換に関して理論的解析を行っている。本研究代表者のグループでは、すでに CW において 7 dB 以上の光強度量子相関を持つ光子対ビームの発生に成功していたが、その発

生波長は上述のように限定されていた。

2. 研究の目的

光の非古典的性質である量子相関は、量子情報通信技術の分野において重要なリソースである。この量子相関を有する光の波長を可変化する技術は、応用上において重要な課題である。本研究では、CW 光パラメトリック発振器から発生させた量子相関光子対ビームを非線形光学効果の和周波混合過程等を用いて、光強度量子相関の波長変換、チューナブル化のための基盤技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず光強度量子相関の波長変換に関して理論解析を行った。光共振器を用いた和周波混合による光強度量子相関の波長変換において最適な共振器パラメーターとポンプ光パワーが存在することが予想され、その条件を理論解析により明らかにした。具体的には、量子相関光子対ビームの片方のビームと別のレーザー光 (ポンプ光) を光共振器内の非線形結晶で和周波混合させ、和周波として波長変換された光を取り出す半古典的モデルを構築する。そして、光子対ビームの相方のビームと波長変換された光の間の光強度相関を半古典的手法を用いて理論的に解析した。次に、理論解析に基づいて和周波数混合用光共振器の設計製作を行い、別のレーザーから注入するポンプ光 (1064nm) を共振安定化させると同時に注入する光子対ビームの一方の光波 (1064nm) と波長変換された 532nm の光波を同時に共振させるための安定化システムを構築した。さらに、装置の改良を施しながら光強度量子相関の波長変換の実験を行った。いくつかの困難な技術的問題点が分かったため、並行して光パラメトリック発振器のチューナブル化の検討を行うと共に光パラメトリック発振器から生成される光子対ビームの波長を直接チューナブル化する技術の開発を行った。

4. 研究成果

光パラメトリック発振器 (OP0) から生成した光強度量子相関を有する光子対ビームを用いて、その量子相関を波長変換する実験システムの概略構成を図 1 に示す。量子相関光子対ビームの片方のビーム (1064nm) と別のレーザー光 (ポンプ光: 1064nm) を光共振器内の非線形結晶 (KTP) で和周波混合させて波長変換を行い、波長 532nm の光を生成する。この時、入力したビームの量子揺らぎが波長変換された出力ビームへ転写される。この結果、

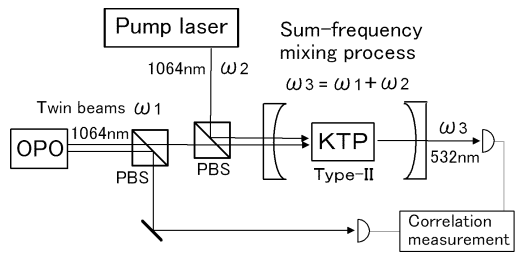


図1 光強度量子相関の波長変換のための構成図

光子対ビームの相方のビームと波長変換された光の間に光強度量子相関が生じることになる。

図1の量子波長変換システムにおいて、光パラメトリック発振器から発生した量子相関光子対ビームの光強度量子相関が、光共振器内の非線形結晶による和周波混合過程でどのように波長変換されるかの理論解析を行った。和周波混合用の光共振器は高効率化のために3波共鳴型とし、別に用意したポンプ光 (ω_2) と光子対ビームの片方 (ω_1) を共振器内の非線形過程で和周波混合させて波長変換された出力光 ($\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$) を取り出す。この出力光と光子対ビームの相方のビームの間の量子相関について半古典的アプローチによる解析を行った結果、古典的な波長変換パワーが最大となるポンプ光パワーにおいて量子相関の波長変換は最適化されることが分かった。

図2に理想的な光強度量子相関を有する光子対ビームを入力した場合の解析結果を示す。ポンプ光モード強度は共振器内で十分に大きく、共振器内損失がない場合を仮定している。横軸の Ω は ω_1 に対する共振器の半値半幅で規格化した周波数である。縦軸 S_r は光強度量子相関の程度を表す光強度差スクイーミングを示しており、1がショットノイズレベルである。また、 ω_1 、 ω_3 の共振モード

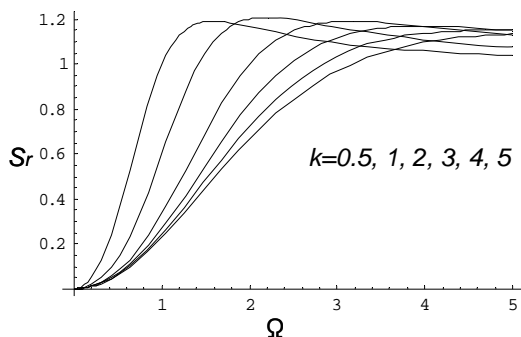


図2 量子波長変換による光強度差スクイーミングスペクトラム ($k = \gamma_3 / \gamma_1$)

のダンピングファクター γ_1 、 γ_3 に関しては、 γ_3 を γ_1 より大きくした方が量子相関の波長変換帯域幅は広くなることが分かった。この理論解析の結果により、量子相関の波長変換システム設計のための重要な指針が得られ、実際の実験装置の設計パラメータの算出が可能となったことは意義深い。以上の結果に基づいて和周波混合光共振器の設計製作と結晶関連の整備を行い、光パラメトリック発振器から発生させた量子相関光子対ビームを用いて別のレーザー光をポンプ光とした和周波混合の実験を行った。当初開発した周波数混合用光共振器では別のレーザーから注入するポンプ光 (1064nm) を共振安定化させると同時に注入する光子対ビームの一方の光波 (1064nm) と波長変換された 532nm の光波が同じ共振器で共振しなければならない構造になっており、これらの光波を同時に共振させながら安定化させるには共振器を独立に制御する必要性が生じるとKTP結晶内で生じるウォークオフによりモード間のカップリングが悪くなるために技術的に実験が困難となった。そこで、共振器の改良を行い共振器内に偏光ビームスプリッターを置いてポンプ光と光子対ビームの光波が別々の共振器で共振する構造とした。532nmの光波は共振器の1つのミラーと非線形結晶の端面にコーティングしたミラーで独立に共振する構造とした。この改良した共振器においても各共振器の安定化のためのフィードバックシステムの競合や共振器内の損失の増加と共振器からの戻り光による光子対ビームの不安定化等による新たな技術的困難が生じた。しかしながら、このような構造の光共振器を波長可変の光パラメトリック発振器として動作させることを新たに着想し、実験の検討を行った。従来のCW光パラメトリック発振器では連続周波数可変特性を得ることは極めて困難であり、新しいアイデアによる波長可変型の光パラメトリック発振器となる。

次に、上記のアイデアに基づいて波長可変の光パラメトリック発振器の開発を進め、チューナブルな光強度量子相関光子対ビーム生成のための技術開発を行った。光パラメトリック発振を行うには、ポンプ光 (p)、シグナル光 (s)、アイドラ光 (i) の周波数間で $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ の条件が必要である。CW光パラメトリック発振器においてシグナル光とアイドラ光の共振器が共通の場合、周波数可変のために共振器長を変化させると、 ω_s と ω_i の両方が同時に増加 (または減少) するため、ポンプ光周波数が一定では上記の光パラメトリック発振の条件が満足されずにチューナブル特性が得られない。そこで、シグナル光とアイドラ光の共振器を独立に構成して、 ω_s が増加 (減少) する時に ω_i が減

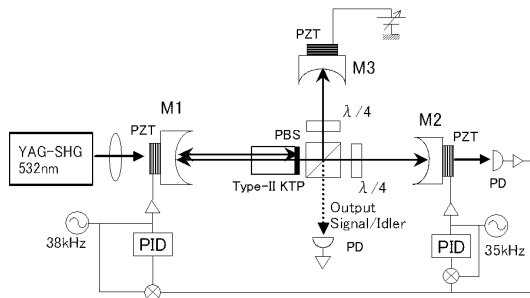


図3 波長可変型光パラメトリック発振器の構成

M1, M2, M3: cavity mirrors

PD: photodiodes

PBS: polarizing beamsplitter

少(増加)するように共振器長を制御すれば、チューナブル特性が得られる。ここでは、Type-IIのKTP結晶を用いていることから、偏光が直交するシグナル光とアイドラ光を共振器内に設置した偏光ビームスプリッタ(PBS)で分離して独立した共振器で構成している。CWで効率良く発振させるために結晶端面にミラーコーティングを施して入力ミラーとの間でポンプ光モードも独立に共振させ、図3に示すような3波共鳴複合共振器を用いた波長可変のCW光パラメトリック発振器を開発することができた。2周波ディザリング法を用いて共振器を安定化した結果、低発振しきい値(30mW)のCW発振が得られて800MHzの連続周波数(波長)可変特性が得られた。スキューニングファブリーペロー共振器を用いて観測したチューナブル特性を図4に示す。さらに、この波長可変型光パラメトリック発振器を用いて光子対ビームを生成する実験を行った。光子対ビーム間の雑音スペクトラムの観測結果を図5に示す。光子対ビーム間に得られた光強度差スキューニングは、1.5dBであった。大きなスキューニングが得られなかった原因は、共振器内に設置したPBSや波長板による共振器内損失の増加によると思われる。

この新しく開発した波長可変型光パラメトリック発振器はシグナル光とアイドラ光による二重共鳴を独立な共振器で行いポンプ光も共鳴させる三重共鳴の複合共振器型光パラメトリック発振器であり、これまでになかった独創的なアイデアであることから特許出願を行った。また、これらの実験結果について国内学会及び国際会議にて報告を行い注目された。連続的にチューナブルな光子対ビームを生成するために、チューナブルなポンプ光源を用いたCW光パラメトリック発振器による例が報告されているが、複雑な制

御システムを必要とするという問題点がある。本方式では波長固定のポンプ光光源を用いて光パラメトリック発振器本来の特徴を活かした方法と言え、これまで困難であったCWでのチューナブルで安定な光パラメトリック発振を実現するものである。制御機構も比較的シンプルであり、3重共鳴であることから高効率な光パラメトリック発振が可能である。これは、各種レーザーをポンプ光源として用いた様々な波長領域でのCW光パラメトリック発振器の開発に資する基盤技術を確立するものである。今後、量子情報通信技術分野でのリソースとしてのみならず、擬似位相整合結晶と組み合わせて遠赤外、テラヘルツ領域での狭線幅CW光源の開発にも繋がる基盤技術であると考えられる。

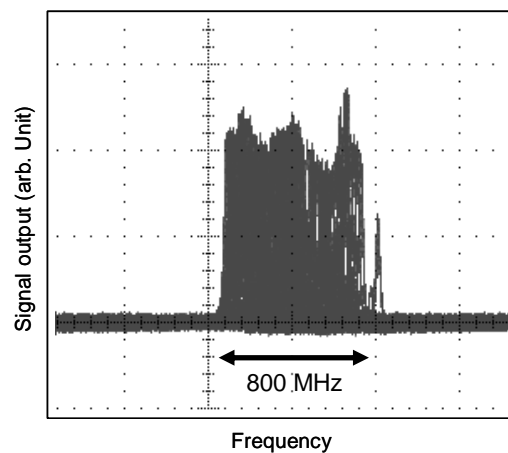


図4 波長可変型光パラメトリック発振器のチューナブル特性

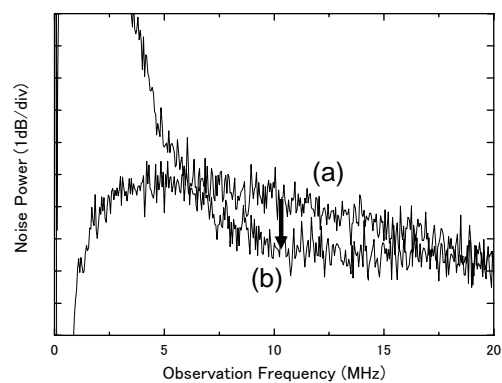


図5 観測された雑音スペクトラム

(a) ショットノイズレベル

(b) 光強度差スキューニング

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1件)

① Katsuyuki Kasai, Stabilization and tuning of a cw optical parametric oscillator with a triply resonant compound cavity, Advances in Optical Sciences: OSA Optics & Photonics Congress, Technical Digest, 査読有, 2009OSA, 2009, CD版.

[学会発表] (計6件)

① 笠井克幸, 光強度量子相関を有するツインビームの生成と応用、応用物理学会分科会日本光学会 第21回コンテナラリーオブティクス研究会、2010年4月8日、電気通信大学(東京都調布市).

② 張贊, 岡田佳子, 渡辺昌良, 笠井克幸, デュアルポート型光パラメトリック発振器を用いた非古典光の生成、第70回応用物理学会学術講演会、2009年9月11日、富山大学(富山県富山市).

③ Katsuyuki Kasai, Stabilization and tuning of a cw optical parametric oscillator with a triply resonant compound cavity, Advances in Optical Sciences: OSA Optics & Photonics Congress, 2009年7月14日, Hilton Hawaiian Village, (Honolulu, Hawaii, USA).

④ 笠井克幸, 3波共鳴複合共振器を用いた連続周波数可変型CW光パラメトリック発振器の開発、レーザー学会学術講演会第29回年次大会、2009年1月12日、徳島大学(徳島県徳島市).

⑤ 笠井克幸, 3波共鳴複合共振器型CW光パラメトリック発振器の開発、第69回応用物理学会学術講演会、2008年9月3日、中部大学(愛知県春日井市).

⑥ 笠井克幸, 光強度量子相関の波長変換技術の開発(I)、第68回応用物理学会学術講演会、2007年9月7日、北海道工業大学(北海道札幌市).

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 光パラメトリック発振器

発明者: 笠井克幸、斎藤伸吾

権利者: (独)情報通信研究機構

種類: 特許

番号: 特願2008-154740

出願年月日: 2008年6月12日

国内外の別: 国内

○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:

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠井 克幸 (KASAI KATSUYUKI)

独立行政法人情報通信研究機構・未来ICT
研究センターナノICTグループ・主任研究
員

研究者番号: 90359084

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: