

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390078

研究課題名(和文)異なる量子状態間の多光子干渉に関する研究

研究課題名(英文) Multiphoton interference between squeezed state and coherent state

研究代表者

張 贇 (Zhang, Yun)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00508830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、世界初デュアルポート共振器利用して第2高調波発生により量子相関を持つ量子状態の生成を試した。また、光パラメトリック増幅器を用いて光のスクイズドとコヒーレントの異なる状態間での多光子干渉の実験を行った。干渉のビジビリティは20%程度となっている。ビジビリティの改善が必要であるが、光の量子干渉に関して、光の位相だけでなく振幅にも依存するという新たな現象を初めて実験的に検証することができた。今後、この原理を応用し、任意個光子を持つNOON状態生成を期待されている。

研究成果の概要(英文)：We present a technique for generation of tripartite quantum-correlated amplitude-squeezed light beams, using frequency doubling in a singly resonant cavity with two output ports. This opens an alternate way to produce tripartite-quantum-correlated systems. On the other hand, We also experimentally show a quantum interference in phase space by interrogating photon number probabilities ($n=2, 3, \text{ and } 4$) of a displaced squeezed state, which is generated by an optical parametric amplifier and whose displacement is controlled by amplitude of injected coherent light. It is found that the probabilities exhibit oscillations of interference effect depending upon the amplitude of the controlling light field. This phenomenon is attributed to quantum interference in phase space and indicates the capability of controlling quantum interference using amplitude. This remarkably contrasts with the oscillations of interference effects being usually controlled by relative phase in classical optics.

研究分野：量子光学

キーワード：squeezed light quantum interference coherent state

1. 研究開始当初の背景

光の干渉は、光学における基本的な現象の一つであり、光の本質を解明する上でいくつかの重要な役割を果たしてきた。一般的に知られている光の干渉現象は綺麗な干渉縞パターンであり、これは古典的な光の干渉の結果として得られているものである。このような現象は、古典的なコヒーレンス理論により容易に説明が可能である。また、光子という観点から見ると、干渉現象は単一光子の干渉と捉えることができ、Dirac の見解である「光子は自分自身とのみ干渉する」からも説明することができる。他方、すべての干渉の根底にある重ね合わせの原理は量子力学における基本原理の一つでもある。それ故に、光の量子干渉(或は2光子干渉)に関する研究は、量子力学の原理を実証する上で最良のテーマであり、特に局所的実在性の否定の実証にも用いられた。2光子干渉に関する研究は、光科学において大きな貢献を果たしてきた。それは量子力学における基本的な解釈に本質的な疑問と矛盾を投げ掛け、結果的に量子力学の正しい解釈へと繋げることができた。実際に、光の干渉実験の中から出てきた量子エンタングルメントに関するアイデアは、20世紀最後に出てきた量子情報科学の新しい研究分野の革新的展開を引き起こしている。また、近年 W. J. Millum らが報告した光子の量子干渉において光の位相だけでなく振幅にも依存するという不思議で新たな現象を実験的に検証する[W. J. Millum and F. Laboe, Phys. Rev. A 85, 023602 (2012)]. この奇妙な量子干渉現象を用いた量子計測と量子通信の潜在能力を最大限に引き出し、多光子の NOON 状態および異なる周波数の多チャンネル単一光子を生成し、量子技術分野にとって不可欠な基盤技術の開発を狙う。

2. 研究の目的

本研究では、光パラメトリック増幅器あるいはビームスプリッターを用いて光のスクイーズドとコヒーレントの異なる状態間での多光子干渉に関する新たな知見の取得をめざす。光の量子干渉に関して、光の位相だけでなく振幅にも依存するという新たな現象が報告されている。従って、異なる量子状態の干渉において n 個の光子数状態を見つける確率は、入射光の振幅に依存するという不思議な現象となる。本研究の目的は、このような奇妙な量子干渉現象を初めて実験的に検

証することである。また、この原理を応用し、任意個光子を持つ NOON 状態生成を狙う。

3. 研究の方法

(1)連続変数3ビーム量子相関状態の生成。デュアルポート共振器利用して、第2高調波長変換により、3ビーム間(基本波、第1ポートの第2高調波と第2ポートの第2高調波)の量子相関を測定した。その上、それぞれのビームについては、強度スクイーズド状態となっている。実験の概要には、図1に示す。低雑音のレーザー光をデュアルポート共振器を用いて第2高調波を発生させ、それぞれの光の強度雑音および強度相関を測定した。

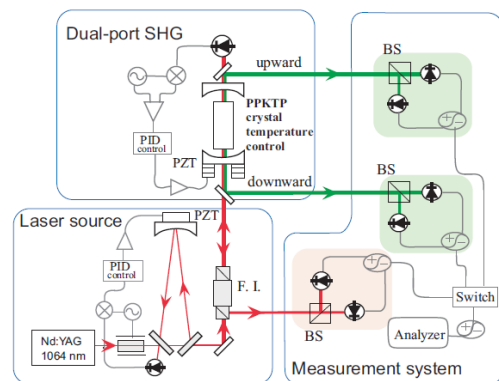


図1 3ビーム量子相関の実験

(2)多光子の干渉の実験提案および実験

我々の提案により、光パラメトリック増幅器あるいはビームスプリッターを用いて光のスクイーズド状態とコヒーレント状態間の多光子干渉に関して新たな知見を得ることができる。これは、多光子干渉の場合、量子干渉は同じ光子数状態間で起こるだけではなく、光子数を重ね合わせた状態とも干渉するという光科学における新たな理解と深く関わっているからである。この光子の量子干渉によると、光の位相だけでなく、光の振幅も依存していることが分かっており、本研究はこれらの実験的に検証を行った。実験については、モード同期チタンサファイアレーザーのパルスから、自発パラメトリックダウンコンバージョン(SPDC)の光とコヒーレント光を干渉させ、単一光子検出器で2光子、3光子と4光子の同時計数確率を用いて評価する。また、位相空間の干渉の概念を用いて得た結果を解釈した。

4. 研究成果

(1) 連続変数 3 ビーム量子相関状態の生成。
 図 2 には、デュアルポート共振器利用して、第 2 高調波波長変換により生成された二つの第 2 高調波および共振器の反射された基本波の強度雑音の測定結果を示す。それぞれは、量子ショットノイズにより 0.5 dB から 0.8 dB 程度低いを示している。

図 3 には、3 ビーム間の量子相関の一つを例としてあげている。ここには、二つ第 2 高調波間の強度の量子相関を示している。二つの間 0.6 dB の量子相関を測定した。それぞれの第 2 高調波と基本波の相関には、0.8 dB と 0.6 dB であった。

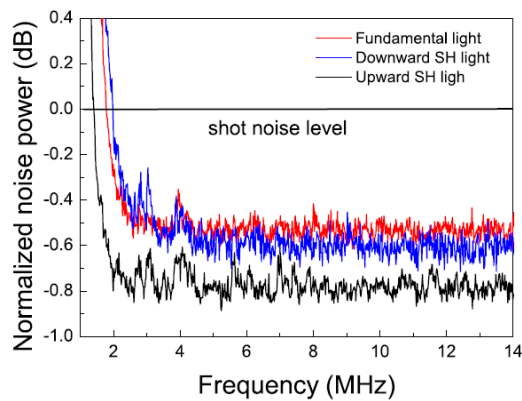


図 2 各光の強度雑音

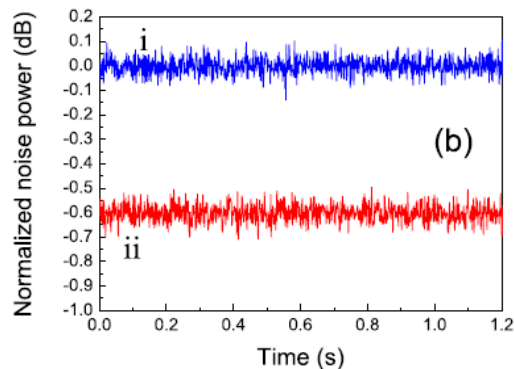


図 3 両第 2 高調波間の量子相関

(2) 多光子量子干渉の提案と実験

光パラメトリック増幅器あるいはビームスプリッターを用いて光のスクイーズド状態とコヒーレント状態の間の多光子干渉に光子の量子干渉による、ブライトスクイーズド状態を生成される。ブライトスクイーズド状態の光子数確率が振動的な分布を示すことは 20 年以上前から理論的に示されており、これまでに多くの研究グループにより実験

的観測が試みられてきた。しかしながら、未だ検証には至っていない。我々は光子数の確率に対して見直した。ブライトスクイーズド状態の光子分布でなく一つ光子数の確率に対して光の振幅の依存関係を求めました。結果は図 4 に示しており、この確率は振動的な分布になることが分かった。

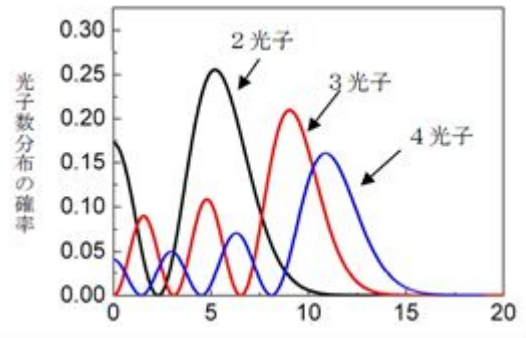


図 4 光子数の確率と光の振幅の関係

実験の概略図を図 5 に示す。ここに示しているのは、光パラメトリック増幅器を用いている。OPA は光パラメトリック増幅器である。Pump はモード同期チタンサファイアレーザーの光を第 2 高調波変換より生成された。Control field injection は、レーザーの出力でコヒーレント状態として使われている。OPA の出力は単一光子検出器で 2 光子、3 光子あるいは 4 光子の同時計数の Control field injection の強度依存性を測定した。

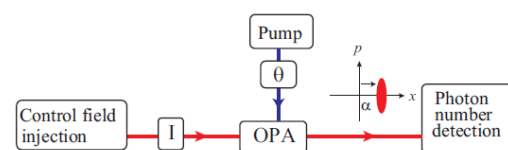


図 5 光子数の確率と光の振幅の関係

パラメトリックダウンコンバージョン生成したスクイーズド状態とコヒーレント光を干渉させ、単一光子検出器を用いて 2 光子、3 光子と 4 光子の同時計数確率を測定して実験を行う。この 3 光子と 4 光子の同時計数確率がブライトスクイーズド状態の変位振幅(コヒーレント状態の振幅)とスクイーズングパラメータ(励起光パワー)によってどのように変化するかを観測し評価した。我々の理論結果では、3 光子と 4 光子の同時計数確率はその変位振幅と励起光パワーに対して振動的に変化することが予測されている。さ

らに、この原理を応用し、任意個数光子を持つ NOON 状態の生成を狙う。図 6 と図 7 には、3 光子と 4 光子の測定した同時計数と Control field injection の強度依存性を示している。式 $A_n [1 + V(1 + C_n \alpha) \cos(2\phi_n)]$ を用いてフィッティングすると、干渉のビジビリティは 20%程度となっている。

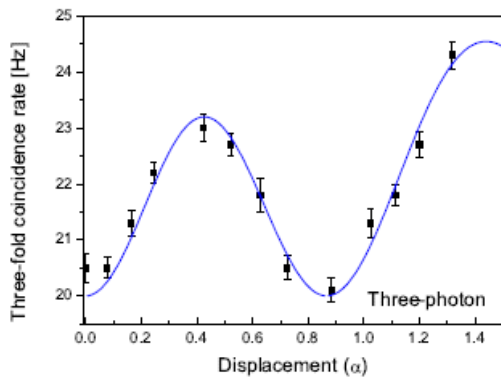


図 6 3 光子数の確率光の強度の関係

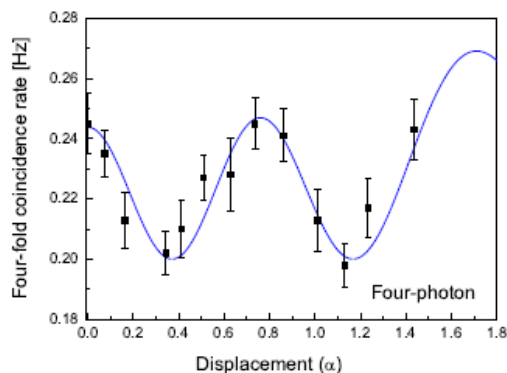


図 7 4 光子数の確率光の強度の関係

(3)まとめ

本研究では、世界初デュアルポート共振器利用して第 2 高調波発生により量子相関を持つ量子状態の生成を試した。量子相関がレーザーなどの雑音を制限しているが、原理上の発生には初めて示した。

光パラメトリック増幅器を利用して、光のスクイズド状態とコヒーレント状態の間の多光子干渉に多光子の量子干渉実験を行った。光子の量子干渉には、光の位相だけでなく、光の振幅も依存している新たな現象が分かった。我々は初めて離散変数領域で実験的な観察を行ったが、干渉のビジビリティは 20%程度となっているため、ビジビリティの改善が必要である。更に、連続変数領域における実験的な検証も行う。このようにして光の本質である波動性と粒子性の観点から両領域をリンクさせることを考えている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1 Yinghong Xue, Tingyu Li, Katsuyuki Kasai, Yoshiko Okasa-Shudo, Masayoshi Watanabe, Yun Zhang, “Controlling quantum interference in phase space,” Scientific Reports 7 2291 (2017). 査読有

2 Wang, Lirong ,Tamaki, Ryo ,Kasai, Katsuyuki , Okada-Shudo, Yoshiko , Watanabe, Masayoshi , Zhang, Yun , ”Low intensity noise and narrow line-width diode laser light at 540 nm,” Laser Physics Letters , 12, 055802(2015). 査読有

3 Li Tingyu ,Ryohei Mitazaki ,Katsuyuki Kasai , Yoshiko Okada-Shudo , Masayoshi Watanabe , Zhang Yun , ”Generation of tripartite quantum correlation among amplitude-squeezed beams by frequency doubling in a singly resonant cavity,” Physics Review A ,91, 0238331~0238335(2015). 査読有

4 Tingyu Li and Yun Zhang, “Proposal for Amplitude Control of Quantum Interference,” Journal of Quantum Optics, 20, 85-89 (2014). 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

1 Daohua Wu, Kota Kawamoto, Xiaomin Guo, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe, and Yun Zhang, observation of two-photon interference for continuous -wave light, the 24th congress of the international commission for optics, Aug. 21-25, 2017, Tokyo (Japan).

2 Yun Zhang, Katsuyuki Kasai, and Masayoshi Watanabe, experimental demonstration of control quantum interference with amplitude, the 24th congress of the international commission for optics, Aug. 21-25, 2017, Tokyo (Japan).

3 Daohua Wu, Kota Kawamoto, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe, and Yun Zhang, Observation of Photon Statistics in Two-Photon Interference for Continuous Variables, The 64th JSAP Spring Meeting, March 14-17, 2017, Yokohama pacific (Kanagawa Yokohama)..

4 Daohua Wu, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe, and Yun Zhang, Measuring photon anti-bunching and photon statistics of continuous-wave light by homodyne detection, 22nd International conference on laser

spectroscopy, June28-July 3, Singapore
(Singapore).

〔図書〕(計0件)

出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

張 贇 (ZHANG Yun)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科

准教授

研究者番号 : 00508830

(2)研究分担者

笠井 克幸 (KASAI Katsuyuki)

情報通信研究機構・未来 ICT 研究所フロン

ティア創造総合研究室

主任研究員

研究者番号 : 90359084