

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02936

研究課題名（和文）光子の対消滅過程を用いた量子吸収イメージング法の実現

研究課題名（英文）Realization of quantum absorption imaging using pair annihilation of photons

研究代表者

岡本 亮（Okamoto, Ryo）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10435951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず、提案手法の理論解析を行った。理論式を導出、光子検出部に損失がある影響下で、従来の量子吸収計測法より高い感度を達成できることを明らかにした。さらに、申請時にはなかったハイブリッド量子吸収計測法を新たに提案、その性能が従来手法を常に上回ることを示した。現在、上記と合わせて、論文にまとめているところである。

また、本提案を実証するために、量子吸収計測システムを構築した。非線形干渉計内の光路の一方に微小な損失を導入すると、出力光子の検出カウント数が増加することが確認できた。さらに、損失の有無によるカウント数の変化量から、イメージングを行った際の、信号雑音比を算出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後、本研究成果をイメージング・分光技術として洗練させることで、吸収イメージング・分光計測における信号雑音比が飛躍的に向上することが期待できる。その結果、生体分子をはじめとする光毒性をもつ試料を破壊することなく高感度に測定できるようになると考えられる。例えば、様々な非蛍光分子の1分子光吸収イメージングが可能になると期待でき、生命科学分野に大きな影響を与えることが期待できる。さらに、本手法の条件を変えることで、可視域の検出器のみを用いた赤外領域の超高感度計測が可能になる。このような点から、本研究成果は、物理化学、生命科学から量子光学まで広範な研究領域に渡って、学術的・社会的な意義を持つと言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, first, we performed a theoretical analysis of our proposal. Our theoretical results show that our scheme surpasses the conventional quantum scheme under photon loss at the detection stage. We also propose a hybrid approach to cope with the case where the photon pair annihilation process is imperfect, and we show that the hybrid scheme always surpasses the conventional quantum scheme.

A quantum absorption measurement system was constructed to demonstrate our proposal. We found that introducing a small loss in one of the optical paths in the nonlinear interferometer increases the number of detected photon counts at the output. Then, we confirmed that the signal to noise ratio in the imaging process can be estimated from the change in the number of detected photon counts.

研究分野：量子光学

キーワード：量子計測 量子情報

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、量子力学の原理を応用することで、回折限界や標準量子限界といった古典的な限界を超える、新しい計測やイメージングが可能になることが分かってきた。申請者らは、2007年、当時最大の4光子の量子もつれ合い光を用いて、干渉計を用いた位相測定における古典的な精度限界を打ち破ることが可能なことを示した。また、最近では、そのような量子もつれ合い光を微分干渉顕微鏡に組み込むことで、奥行方向の分解能を古典的な限界を超えて向上させることに成功している。このような、量子計測・イメージングといった分野は、非常に広い応用の可能性があると同時に、計測における物理的な限界を追求することで、量子と古典の境界についてより深い洞察を我々に与えてくれる。一方、上記の研究はすべて、量子効果により、位相測定の感度を向上させるものであった。しかし、位相測定は、様々な光計測技術の一部でしかない。例えば、「吸収」も非常に重要な測定対象であり、吸収測定における古典限界を突破することができれば、広い分野で大きな進展が見込まれる。例えば、生体イメージングの分野では、蛍光測定が一般的だが、吸収による測定であれば、蛍光タンパクに頼らないイメージングが可能になる。しかし、吸収測定は、蛍光測定と異なり、光源の量子ノイズによる信号雑音比の低下という大きな問題がある。そのため、1分子の吸収イメージング測定は、様々なテクニックを駆使することで、近年ようやく可能になってきた。しかし、量子ノイズに埋もれずに信号を検出するために、いずれの手法でも比較的長い積算時間(数百ミリ秒～数秒)が必要となってしまう。そのため、光に長時間さらされることで生体分子等の測定サンプルが破壊されてしまう可能性がある。そのような中で最近、吸収分布のイメージングにおいて、量子的な相関を持った光を用いることで、量子ノイズを抑制し、古典的な限界を超える信号雑音比を実現することが可能であることが実証されている。しかし、この手法では、量子性が、検出部の光子の損失の影響により急速に失われてしまう。そのため、量子効果によって得られる実際の恩恵はわずかなものであった。

2. 研究の目的

本研究では、出力部の二つの光子検出器の出力信号間の相関を測定する代わりに、光子の対消滅過程を用いることで直接的にその相関を測定する。光子の対消滅は、非線形干渉計と呼ばれる、非線形光学結晶間で起こる光子対の確率振幅の干渉現象により実現する。干渉計内の位相差を適切に制御することで、破壊的干渉条件を実現、光子を対で消滅させる。上述の従来の量子吸収計測法では、量子光源から発生した光子対をそれぞれ光子検出器で検出し、検出光子数の差分を取る。実験系の中に全く光子の損失がない場合、光子は常に対で発生するため、検出光子数の差は常に0になる。一方で、光路にサンプルが設置してあり、光子が失われると、そのバランスが崩れ、差が0からずれることになる。このようにして、従来の量子吸収計測法では、吸収を検出する。しかし、一般に、光子検出器の検出効率といった実験系の意図しない光子の損失によって、その性能が急速に劣化する。そこで本研究課題では、出力部にて光子検出数の差分を取るかわりに、光子の対消滅過程を用いることで、この問題を克服、吸収イメージング測定における、飛躍的な信号雑音比の向上を目的とする。本研究を進展させることで、将来的には、単一分子のような非常に吸収率の小さな測定対象の吸収イメージングや分光が自在にできるようになることが期待できる。

3. 研究の方法

下記の4つの方法で研究を進めた。

I. 量子光源の開発

パラメトリック下方変換と呼ばれる二つの光子が対で同時に発生する過程を用いた。ポンプレーザー光を非線形光学結晶に入射すると、光子が対で同時に発生する。非線形光学結晶としては、BBO結晶を用いた。本研究では、光子対の消滅過程での量子干渉の安定化のために、発生する光子対をポンプレーザー光と同軸に発生させた。また、TYPE IIの位相整合条件を用いることで、偏光を用いて発生した光子対を分岐できるようにした。

II. 光子の対消滅系の構築

量子干渉効果を用いて、光子の対消滅を実現する装置を構築した。Iで実現した量子光源から発生させた光子対を、ポンプレーザー光とともに、再度非線形光学結晶に入射した。ポンプレーザー光と光子対との位相差を適切に設定することで、入射光子対の確率振幅と、新たに発生する光子対の確率振幅が、破壊的な量子干渉を起こすことで、光子対が消滅することを確認した。

III. 量子吸収計測システムの構築

従来型の量子吸収計測法と、本提案の光子対消滅型の量子吸収計測法の両方を同じ実験系上で評価できる量子吸収計測システムを構築した。これにより、光源の性能や、サンプル部の条件に依存しない定量的な比較が可能になる。さらに、構築した実験系では、古典的な吸収計測も実現した。これは、量子光源から発生した光子対のうち、片方の光子のみを用いることができるように実験系に工夫を加えることで可能にした。

IV. 理論的な検討

提案手法の吸収計測における感度を理論的に導出、従来の量子吸収計測法や、古典的な吸収計測法との性能比較を行った。また、当初提案していた量子吸収計測法を拡張、複数の検出法を組み合わせたハイブリッド量子吸収計測法を新たに提案、その有効性を理論的に検証した。

4. 研究成果

本研究において下記の研究成果を得た。

(1) 理論解析及び、新手法の提案

提案手法の理論解析を行った。生成消滅演算子を用いた計算に、実験的にあり得る不完全性を考慮した。具体的には、各光路の透過率、光子の対消滅の効率、そして光子検出器の検出効率を実験的なパラメータとして導入した。また、吸収計測の性能を表す指標として、どれだけ小さな吸収を検知できるかを、ショットノイズ限界で規格化した吸収感度を考案し、導出した。理論式を分析した結果、本提案手法(図1(a))は、検出部の光子の損失の影響下でも、高い感度を維持できることが分かった。従来の量子吸収計測法では、検出部での光子の損失により、感度が急速に低下し、損失が50%以上になると、古典的な吸収測定法よりも性能が低下する。一方、本研究の提案では、光子の損失が大きくなって古典的な測定に比べて優位性が維持できることが分かった。さらに本研究では、光路内の光損失と光子の対消滅効率が、本方式の性能にどのような影響を与えるかを詳細に分析し、具体的にどのような状況で、本手法の利点が発揮されるかを明らかにした。また、光子の対消滅が不完全な場合に対応するためのハイブリッド量子吸収計測法を提案(図1(b))し、ハイブリッド方式が従来の量子吸収計測法を常に上回ることを示した。現在、本成果を論文にまとめているところである。

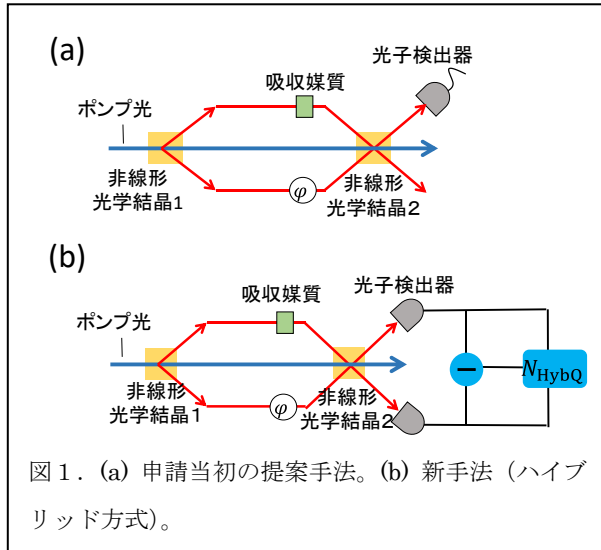


図1. (a) 申請当初の提案手法。(b) 新手法(ハイブリッド方式)。

(2) 検証実験

量子吸収計測システムを用いて、信号雑音比を評価した。図2は、構築した実験系の概念図である。ポンプレーザー光をTYPE IIのBBO結晶に入射し、パラメトリック下方変換過程を介して、光子を対で発生させた。ポンプレーザー光はダイクロイックミラーで反射し、ミラーで反射されBBO結晶に再度入射された。同時に、発生した光子対も偏光ビームスプリッターで分岐した後、ミラーで反射、ポンプ光と同様にBBO結晶に再度入射された。図のように折り返し型の実験系を考案することで、非常に安定な非線形干渉計を実現した。その後光子対は、偏光ビームスプリッターで分岐し、シングルモードファイバに結合、光子検出器で検出された。非線形干渉計内の光路の一方に微小な損失を導入し、光子のカウント数の変化を測定した。この時、光子が対で消滅する条件、つまり光子対の確率振幅の干渉過程で光子対が破壊的な干渉を起こすように位相を制御した。すると光路上の微小な損失により、出力される光子のカウント数が増加することが確認できた。さらに、損失の有無によるカウント数の変化量から、イメージングを行った際の、信号雑音比を算出することができた。

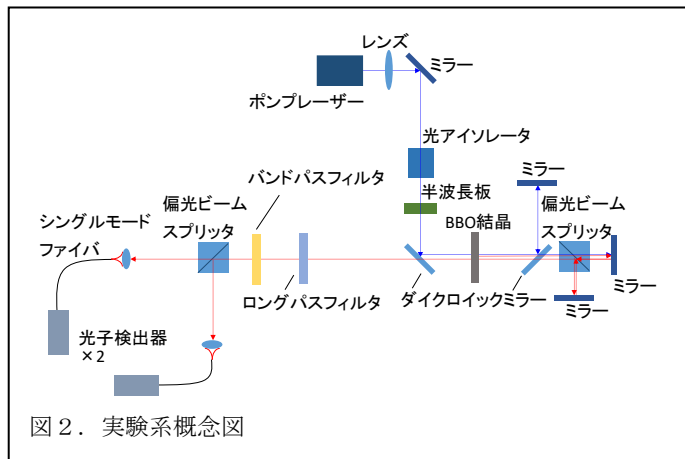


図2. 実験系概念図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡本 亮
2. 発表標題 Photonic quantum circuits for quantum measurement
3. 学会等名 Asia pacific laser symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本 亮, 竹内 繁樹
2. 発表標題 微弱光ガウシアン量子イルミネーションの実現
3. 学会等名 第79回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本 亮
2. 発表標題 光子を用いた量子情報科学・技術
3. 学会等名 非エルミート系, 及びその光学実験に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富上優太, 岡本亮, 竹内繁樹
2. 発表標題 光子対発生の破壊的量子干渉を用いた新規吸収計測法の検討
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本 亮
2. 発表標題 量子的な光を用いたイメージング技術
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本 亮, 富上優太, 竹内繁樹
2. 発表標題 量子的な光を用いた計測・イメージング技術 -極限的な微弱吸収検出に向けて-
3. 学会等名 光拠点シンポジウム
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