

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740231

研究課題名（和文） M&Pの観点から検証するEIT型メモリの量子性

研究課題名（英文） Quantum property of EIT memory from the view point of M&P

研究代表者

本多 和仁 (KAZUHITO HONDA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70408706

研究成果の概要（和文）：

真空スクイズド光は光の持つ量子的なゆらぎを不確定性原理を破らない範囲で小さくした非古典的な光である。この性質から量子情報の担い手のひとつとなっている。実験代表者はこの光を原子気体に保存・再生を行ってきたが、今回、その効率を向上させることに成功した。

また、強度が時間変化する、うなり（ビートを打つ）の光のゆらぎを小さくした真空スクイズド光も保存・再生した。これにより、観測するゆらぎが高周波となり、環境ノイズに邪魔されない検出が可能になった。

研究成果の概要（英文）：

A squeezed vacuum is a non-classical light, whose quantum deviation becomes small along uncertainly principle. Therefore it is considered as one of quantum-information carriers. This study representative had already succeeded in storage and retrieval of that light, and he has succeeded in improvement of it.

He has also succeeded in storage and retrieval of a squeezed vacuum of a beet mode. This technique makes the measured deviation be high frequency, and allows us to observe it without the environment noise.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス、原子・分子物理学、応用光学・量子光工学

1. 研究開始当初の背景

量子情報の担い手の一つに光がある。光は遠くまで、損失なく、高速で情報を伝達できるため情報の媒体として有用である。また、量子情報を運ぶことができる光、例えば単一光子状態や真空スクイーズド状態といった非古典的な光を生成する技術が発達していたこともあり、量子情報ではこの非古典的な光は非常に重要であった。事実、量子テレポテーションなどの実験は光を用いて行われてきた。

確かに光は量子情報の担い手として有用であるが、万能ではない。一つ挙げれば、光はとどめることができない点が挙げられる。そのため、量子情報を乗せた光を一旦作った場合、それをすぐに使わなければならない。しかし、情報では伝達するだけでなく、記録できる点も重視される。すぐに消費しなければならない光は情報記録には不向きである。そこで、光に乗った量子情報をほかの物質に移し保存する、量子メモリが必要となる。

よく使われる非古典的な光は単一光子状態の光である。これは呼んで字の如く、単一の光子からなる状態である。この単一光子が来るか真空か、によって量子情報を伝える。この光は比較的容易に生成することができる。量子メモリの開発も行われている。しかし、単一の光子からなるため、損失によって情報が失われてしまう。しかも、情報としての真空なのか、光子が失われて真空になったのかの区別がつかないため、実用的ではない。

一方、真空スクイーズド光と呼ばれる非古典的な光は、2個、4個、6個……といった偶数個の光子数状態を重ね合わせた状態である。もちろん、光子が一つ失われるだけで状態が大きく変化し、情報が失われることは単一光子状態と同じであるが、光子は存在しているため、情報が失われたことを確認することができる。

当時、研究代表者は世界に先駆け、真空スクイーズド光の保存と再生に、電磁誘起透明化現象を用いることで成功していた。これにより、真空スクイーズド光に対応する量子メモリが現実的になった。そこで、その保存・再生能力から量子メモリとしての性能がどの程度になるか推定し、他の光や方法を用いたものとの比較を行っていかなければならない。しかし、その性能を推定する方法で、当時知られていたものには問題があった。その評価方法は保存する前の光の状態と再生された光の状態を比較する方法で、古典的な光

や単一光子状態などの、損失によって状態が大きく変化する光に関しての評価方法としては十分であったが、真空スクイーズド光は損失があっても元の状態と大きく変わらないため、この方法では性能が実情に比べて高めに評価されてしまう欠陥があった。また、実際の量子メモリの性能との関係もあいまいであった。そのため、性能比較をするためにはこの方法を捨て、量子情報を実際に真空スクイーズド光に乗せて保存・再生して比較するか、ほかの方法を考えなければならない。

Measurement and Preparationはそういった方法の一つである。この方法は量子メモリの性能を直接測定する方法であるにもかかわらず、真空スクイーズド光と同程度の強度のレーザー光を用いるだけで量子メモリの性能を評価できる。そこで、この方法を用いた評価法を確立する必要があった。

一方、研究代表者は真空スクイーズド光の保存・再生に成功していたが、その効率は大変低く、改善しなければ量子メモリとして実用することは不可能であった。

2. 研究の目的

電磁誘起透明化(EIT)を用いた光量子メモリの手法の量子性を Measurement and Preparation (M&P) の観点から実験的に検証することにある。この検証によって、EITに限らず、各種の量子メモリ研究に一種の価値指標が確立し、それぞれの量子メモリを同一の判定法を用いて比較検討することが可能となる。また、原子密度を上げるなどして電磁誘起透明化の性能を向上させる。

3. 研究の方法

光は非古典光も古典的な光もレーザー光のようなコヒーレント状態の重ね合わせとして表現できる。つまり、光はコヒーレント状態を基底とした空間で表現できる。そこで、その基底が保存・再生できれば、その重ね合わせ状態も保存・再生できることになる。

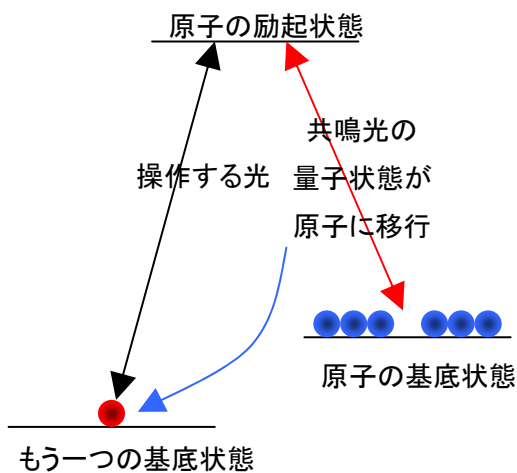
様々な位相と強度のレーザー光を保存・再生させる。これと、古典的なメモリ（光の強度などを測定し、記録）の性能を比較する。古典的なメモリの性能は計算によって算出することができる。

一方、性能向上には光路における損失をなくし、原子密度を上げるなどが必要になる。また、現状では低周波の信号しかえられないため、低周波のノイズの悪影響があった。そこで、高周波領域の信号が得られるように工夫をする。

4. 研究成果

量子メモリの評価に関しては、申請後に海外のグループにより結果が出たため、性能向上に絞って研究を進めた。

われわれの用いる保存・再生の方法は、電磁有機透明化という方法である。これは、二種類の光に応答する原子気体にその二種類の光を当てると、一方の光の強度を制御することによりもう一方の光の量子状態が原子に移行する現象である（下図）。この二種類の光と原子の干渉により、原子と光が共鳴条件にあるにもかかわらず原子は励起状態になることがないため、原子は光を吸収しない。これにより原子気体は透明となるのでこの名がある。この状態で、操作する光を変動させ、光の状態が原子の状態に移ったり、原子



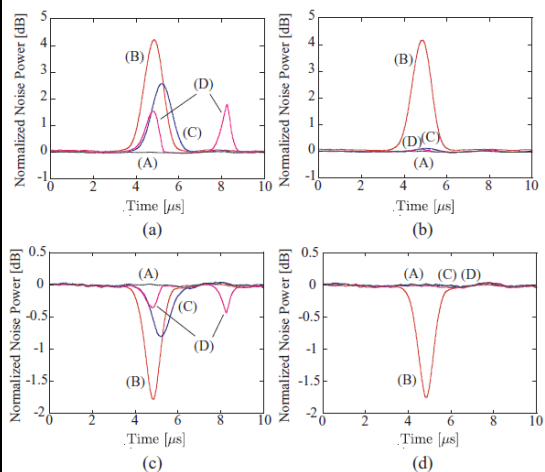
の状態に応じた光が発生したりすることで、光の量子状態を保存・再生する。

この時、二種類の光の重なり具合が保存効率に影響しているのではないかと考え、制御する光の光径を大きくした。また、鏡一枚一枚を検証し、保存・再生に用いる原子気体の個数・密度を上げた。保存・再生する光である真空スクイズド光は、測定器のノイズをショットノイズより小さくすることに特徴があるが、改善前の保存再生後の光のノイズがショットノイズに比べ -0.2 dB だったのに対し、改善後は -0.4 dB と改善することができた。

前述のように、真空スクイズド光はノイズをショットノイズ以下に下げる。ノイズには様々な周波数成分が含まれている。ところが電磁誘起透明化は制御する光に対応する狭い周波数域の光しか保存できない。そのため保存される真空スクイズド光はノイズの低周波成分となる。しかし、この領域は交流電源などの環境ノイズが大きく、観測しにくい。そこで、制御する光に工夫することで、真空スクイズド光のノイズの高周波成分を保存・再生した。

下図(a), (b)は真空スクイズド光のパルス(B)を保存・再生した物を表している。(D)の右側のパルスが再生された真空スクイズド光である。特に図(c)はショットノイズ(A)よりもノイズが小さくなっており、この光の非古典性を保存していることがわかる。ところで、ある周波数の光のノイズにも位相があり、電磁誘起透明化では位相の異なる成分は保存されない。図(b)(d)はそれを示しており、状態はショットノイズと同じ、真空状態になっている。

この成果により、信号は高周波となり、検出しやすくなった。また、ノイズの周波数を変えることで、ひとつの原子気体に複数の量子情報を保存できる可能性が広がった。



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 M. Arikawa, K. Honda, D. Akamatsu, S. Nagatsuka, K. Akiba, A. Furusawa, M. Kozuma, Quantum memory of a squeezed vacuum for arbitrary frequency sidebands, Physical Review A **81**, 021605 (2010), 査読有り

[学会発表] (計 3 件)

- ① 有川学, 本多和仁, 赤松大輔, 永塚哲史, 古澤明, 上妻幹旺, 真空スクイズド状態に対する 2 色電磁誘起透明化の観測, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, (東京都)
- ② 笠原嘉晃, 長崎慎, 中田正博, 山本雄樹, 本多和仁, 上妻幹旺, 磁気双極子相互作用由来の物性観察に向けた全光学的手法によるボース凝縮体生成の取り組み, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日
- ③ Kazuhito Honda, Improvement of Storage and Retrieval of a Squeezed Vacuum, 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 11/25/2008, Prefectural New Public Hall (Nara)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本多 和仁 (KAZUHITO HONDA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：70408706

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし