

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287101

研究課題名(和文) 時間反転対称性に基づく量子相関の制御と光計測への応用

研究課題名(英文) Control of quantum correlation based on time-reversal symmetry and its applications to optical measurement

研究代表者

北野 正雄 (Masao, Kitano)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70115830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：時間反転対称性に基づき構築された光学系により実現可能な光計測の理論を提案すると共に、さまざまな高感度計測の応用に向けた検証実験を行うことを目標とした。特に、時間相関のある光子対を用いた2光子干渉実験の時間反転光学系を考えることにより、位相超分解干渉や光断層測定における分散消去などを古典光で実現することに成功した。これらは、従来非常に微弱な量子的な光を用いて実現されてきたが、提案手法により高強度の古典光から高強度の信号を高効率で得ることができるため、より実用に近い高感度測定手法の発展につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the project is to propose novel methods for optical measurements using optical systems designed on the basis of the time-reversal symmetry, and to experimentally demonstrate the proposed optical measurements for the applications of various ultra-sensitive measurements beyond conventional methods. In particular, we focus on time-reversal optical systems inspired by two-photon interference using time-correlated photon pairs, and demonstrated phase superresolution in two-photon interference and dispersion cancellation in optical coherence tomography with classical light. These applications have been demonstrated using purely quantum light with extremely low intensity. On the other hand, the proposed methods enable us to obtain intense signals from strong classical light with high efficiency, and they are expected to lead to the development of more practical sensitive measurements.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子光学 時間反転対称性 光計測 量子相関

1. 研究開始当初の背景

光計測の技術に量子光学の手法を導入する量子光計測の分野が著しい進展を遂げており、その中でも弱測定による測定精度の向上と量子相関を利用した高感度量子測定に我々は注目していた。弱測定はノイズの少ない測定結果のみを読み取る「事後選択」を行なうことによって、測定精度を向上させる。我々は、弱測定の研究を通して測定精度の向上に「幾何学的位相」が深く関わっていることに着目していた。量子相関を利用した高感度量子測定では光子対を用いた位相の超感度測定や量子光コヒーレンストモグラフィ (量子 OCT) が研究されていたが、光子対の生成効率の低さや検出速度の問題など実用上の問題も多かった。その問題を解決する1つの方法として、量子系の時間反転対称性を利用した方法が提案され、量子 OCT を古典的なチャープ光を用いて実現する方法が実証されていた。しかし、この時間反転対称性の量子光計測への応用に関しては、まだ初期段階にあり、研究が十分に進展しているとはいえなかった。

2. 研究の目的

時間反転対称性にに基づき構築された光学系 (以下、時間反転光学系) により実現可能な光計測の理論を構築すると共に、さまざまな高感度計測の応用に向けた検証実験を行うことを大きな目標とした。特に、本研究では時間反転光学系による2光子干渉の実現方法の提案と検証実験に重きを置き、2光子干渉に特徴的な位相の超分解干渉と Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉を光子対といった量子光ではなく、完全に古典的な光で実現することを目的にした。これまで量子光でしか実現できないと考えられていた現象に対して時間反転光学系を考えることで、その現象を異なる角度から検証し、本質的に重要な要素を明らかにすることができる。

位相の超分解干渉においては、2つの光子がセットで干渉するために、波長の半分の分解能の干渉信号を100%の明瞭度で得ることができる。そして、HOM干渉においては、量子OCTへの応用が可能で、分散による分解能の低下を光子間の相関を利用して回避することが可能になる。以上に加えて、我々が以前提案していた高次元の幾何学的位相の検出を時間反転光学系で実証することも目標とした。

3. 研究の方法

通常、位相の超分解干渉と HOM 干渉に代表される2光子干渉信号の取得は、周波数空間と時間空間双方で相関のある光子対を干渉計に導入し、その後光子検出器において同時検出することで実現される。この時間反転光学系として、同時検出を2つの古典パルス光に置き換え、光子対の生成を2つの古典パルス光の和周波混合に置き換えることで実現

する。和周波混合とその後の狭帯域フィルタにより特定の周波数相関をもった成分のみを検出することで、光子対のもつ周波数相関を事後選択で模擬することができる。そして、干渉計内部の2光子干渉に必要な成分は、パルスの時間分布の自由度、進行方向の自由度、そして偏光の自由度を最大に利用することで除去する。本方法においては、時間反転光学系の他の研究で用いられているチャープ光ではなく、ガウシアンパルス光を用いるので光学系が単純になり、精度の面でも有利である。

時間反転光学系における位相の超分解干渉においては、干渉計の1つの経路の長さを変化させ、和周波光に現れる干渉信号の周期と明瞭度を観測する。

HOM干渉の時間反転光学系での実現においては、そのOCT技術への応用として信号からの分散除去を実証する。測定対象の試料の前に分散媒質を設置することで、群速度分散を導入し、干渉信号がどのように変化するかを観測する。また、時間反転光学系を考えることで分散除去の実現に必要な要素は周波数相関のみであることが明らかとなったため、従来のOCTの計測結果に周波数相関の計算処理を施すことで分散除去が実現可能であることを実証する。

高次元の幾何学的位相の検出にも和周波混合による2光子干渉信号を利用する。干渉計の2つの経路における2つの光子の偏光と最終的に和周波混合で変換される2つの光子の偏光が3状態系の幾何学的位相を定義し、干渉縞のずれとして観測される。

4. 研究成果

(1) 時間反転光学系を用いた2光子干渉における位相超分解能の実現

マイケルソン干渉計に代表される2光束干渉計において、通常の干渉(1光子干渉)では、干渉計の片側の光路長の変位に対して、干渉信号は波長と同じ周期で変化する。これに対して、2光子干渉では2つの光子が組であったか1つの光子のように振る舞うので、波長の

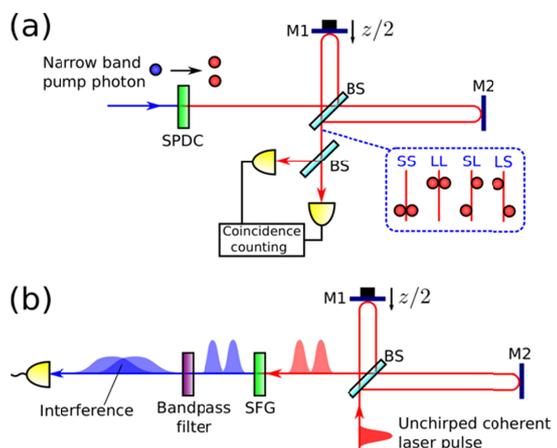


図 1 (a) 従来の光学系における位相超分解 (b) 時間反転光学系における位相超分解

半分の干渉縞を得る。この特性を、2光子干渉における位相の超分解と呼び、波長分解能を超えた計測への応用が期待されている。例えば、図 1(a)のような、干渉計でこの 2光子干渉は実現される。この系では、非線形光学結晶に光パルスを入射することで生成される量子相関をもつ光子対を利用し、干渉計に導入した後に同時検出することで2光子干渉信号を得る。2光子干渉による位相の超分解は2つの光子が組で干渉計を進行する際に実現されるので、干渉計の別の経路を通過する成分は同時検出にかからないように工夫されている。しかし、この方法では、光子対の生成効率の低さと同時検出の速度が実用上の大きな障壁となっている。

これに対して我々は、同図(b)のような時間反転光学系を考案した。入力は、ガウシアンパルス光であり、パルスレーザー光をそのまま利用することができる。干渉計に導入された光はその後、非線形光学結晶内の和周波混合過程で、2つの光子が周波数の高い1つの光子に変換される。そして、狭帯域フィルタ通過し、通常の光検出器で観測される。観測される光は、周波数とが一定の2つの光子が変換されたものであり、和周波発生と狭帯域フィルタで2光子干渉に必要な光子間の周波数相関を抽出していることになる。また、光パルス内の光子が別々の経路を通った場合は干渉計通過後のパルスが時間的に分離しているために和周波変換に寄与しない。

以上の原理に基づき実験を行った。実験結果は、予想通りの位相の超分解干渉に対応する波長の半分の周期の干渉縞を観測し、その明瞭度は 98%という高い値を取った。また、干渉信号の強度も数マイクロワットに達した。これらの値は従来法ではなしえない高い値で、チャープなしの古典光を用いることの大きな利点といえる。この成果に関しては、論文[Phys. Rev. A, 91, 062118 (2015)]に掲載されている。

(2)時間反転光学系を用いた分散消去のガウシアンパルス光による実現

光コヒーレンストモグラフィーは、光を用いた断層撮影法として盛んに研究されている。しかし、測定対象に分散がある場合には、分解能が悪化する問題がある。これに対して、光の量子性に起因する量子相関を利用することで分散の影響を消去することができる。しかしながら、光源として光子対など微弱な光を利用するため信号強度が低いという欠点があった。これに対して、古典的なチャープ光を利用することで、同様の分散消去を実現する方法が考案された。本研究では、これをさらに発展させ、チャープのないガウシアンパルスを用いて分散消去を実現する方法を提案した。

図 2 (a)に光学系の概略を示す。干渉計に偏光の異なる2種類の光パルスを導入する。

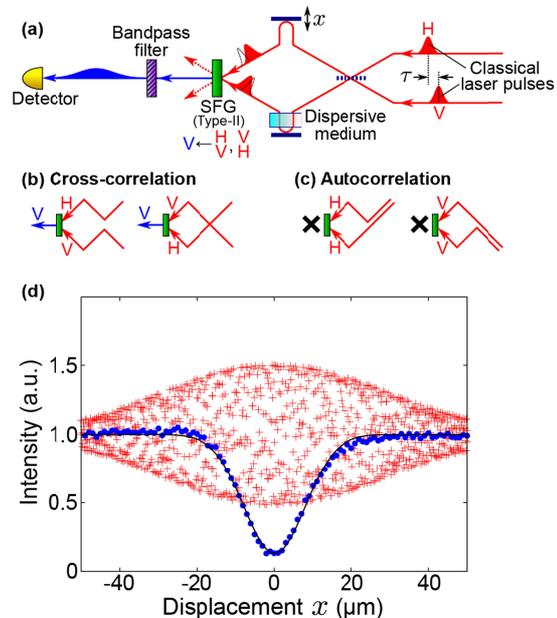


図 2 ガウシアンパルス光を用いた分散消去。(a) 実験系の概略。(b)相互相関成分。(c)自己相関成分。(d) 分散媒質存在下での干渉信号。赤は白色干渉信号。青は提案手法における HOM 干渉信号

この2つのパルスの時間差は掃引することができる。干渉計に導入された光パルスは、ビームスプリッタで混合され、2つの経路を通る。経路の片側が測定対象で、ここでの反射面を Hong-Ou-Mandel (HOM)干渉と呼ばれる2光子干渉信号で推定することが目的となる。また、分散消去の検証を行うために、分散媒質を挿入することができる。もう一方の経路は、ミラーの位置により光路長 x を掃引できる。これら2つの経路を通った光は、非線形光学結晶で交差し、周波数混合を起こす。ここで発生した和周波光を狭帯域フィルタで帯域制限した後に検出する。和周波生成は、別々の経路を通った光子の組のみが変換されるように位相整合条件を設定している。そして、HOM干渉を起こすのは、図 2 (b)に示した、相互相関成分であり、同図(c)に示した自己相関成分は不必要となる。これを、実現するために和周波生成に Type-II の位相整合条件を利用した。これにより、水平偏光の光子と垂直偏光の光子の組のみが和周波変換され、不必要な成分に対しては変換が起らない。最終的な和周波光は、初期パルスの遅延と干渉計の光路長差 x の関数として取得される。そして、遅延量に関して積分することで必要となる HOM 干渉信号を得る。

実験結果の一例を図 2 (d)に示す。青点は、ミラーの反射位置を 5mm の分散媒質 (ZnSe) 越しに観測した際の HOM 干渉信号である。比較のために従来法(1光子干渉)で測定した、白色干渉信号を赤点で示す。従来法と比べて、分解能が良いことが分かる。また、この HOM 干渉信号は分散媒質がない場合とほぼ同じ分解能であることも確認しており、本時間反転光学系により分散消去が実現されている

ことが実験的に示された。この結果に関しては、論文[Phys. Rev. A, 91, 013846 (2015)]に掲載されている。

上記の手法をさらに発展させ、複数の反射面があるときに生じるアーティファクトおよびそれに伴って発生するバックグラウンド信号を除去する方法を考案した。干渉計内の偏光を操作することにより干渉条件を切り替え、その差分を取ることで必要となる信号のみを抽出する。実験は、硬貨の断面撮影を分散媒質の影響下で行い、分散の影響を受けずバックグラウンドもない信号の取得に成功した。この成果に関しては、論文[Opt. Express, 24, 8280 (2016)]に掲載されている。

(3) 周波数の強度相関計算を利用した波長掃引光源 OCT における分散消去

時間反転光学系を用いた HOM 干渉を実証する過程で、OCT における分散消去を実現するために本質的に重要なのは周波数相関のみであり、時間相関は不要であることがわかった。そこで周波数成分ごとのスペクトル強度を観測して、周波数相関の計算処理のみで分散消去を実現する手法を提案し実証実験を行なった。時間反転対称性を利用した量子 OCT と比較すると、計算処理により深さ分解能が若干低下するが、従来の OCT の実験系を変えることなく分散の影響を除去できるという利点がある。

スペクトル強度を利用する OCT 技術はフーリエ領域 OCT としてすでに広く知られている。特に波長掃引光源を入射光としてスペクトル強度計測を行なう Swept Source OCT (SS-OCT) は、広帯域光源を用いる従来の OCT よりも非常に高速な断面撮影が可能であることから、現在の主流となっている。

一般的な SS-OCT の実験系を図 3 (a) に示す。時間的に波長 (周波数) が変化する光波をマッハツェンダー干渉計に導入する。干渉計内の経路の片側を測定対象とし、もう一方の経路の光波は参照光として用いる。測定対象からの反射光と参照光の干渉信号の変化をフォトダイオードで時間的に測定すれば、周波数ごとの干渉強度を得ることができる。周波数領域における干渉信号の周期は測定対象からの反射光と参照光の光路差に比例するため、フーリエ変換すれば光路差に対応した位置にピークが現われ、反射位置の特定が可能となる。

しかし、測定対象が高い分散を持つ媒質の場合には、干渉信号の周期が一定とならず、フーリエ変換後のピークの幅が広がり、結果として深さ分解能が低下する。そこで図 3 (b) に示すように、干渉信号に対して、中心周波数 Ω_0 から正負にずれた周波数 $\Omega_0 \pm \omega$ に対する位相の差分を計算する処理を施す。深さ分解能の低下を引き起こす主な要因は、干渉信号の位相 $\phi(\omega)$ に含まれる角周波数 ω の

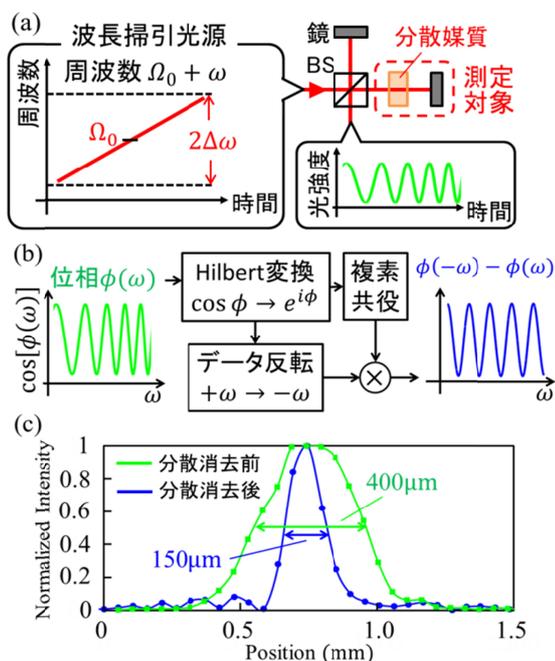


図 3 計算処理による分散消去。(a) 実験系。(b) 分散消去の計算処理。(c) 分散消去計算前と計算後の干渉信号のフーリエ変換波形。

二乗項 (二次の分散) であるため、計算処理後の位相 $\phi(-\omega) - \phi(\omega)$ に分散の効果は現れず、深さ分解能が回復する。

実験では中心波長 1550nm、掃引速度 0.18nm/s、掃引波長幅 30nm の波長掃引光源を使用した。この光源を用いた場合の理論的な OCT 深さ分解能は約 100 μm である。また分散媒質としては厚さ 5cm の ZnSe を用いた。分散消去の計算前と計算後の干渉信号のフーリエ変換波形を図 3 (c) に示す。分散により 400 μm まで広がったピーク幅を、分散消去の計算処理により 150 μm まで改善することに成功した。理論的な分解能には達していないが、これは波長掃引光源の出力波長毎の強度変化や掃引の非線形性に起因していると考えられる。実際、分散媒質がない場合のピーク幅は分散処理後のピーク幅とほぼ一致している。

さらに複数の反射面に対する SS-OCT の実験を行ない、分散消去の計算処理を行なった。このとき、時間反転光学系の場合と同様に、分散消去の計算過程で二つの反射点のちょうど中間に余分な信号 (アーティファクト) が発生してしまう。そこで分散消去の計算後に中心周波数 Ω_0 について平均化処理を行なうことでアーティファクトを除去する手法を考案し、多重反射についても分散の影響を消すことが可能であることを実験的に確認した。

(4) 3 状態系幾何学位相の時間反転光学系による観測

幾何学的位相とは、量子状態の変化に伴い、状態空間の歪曲という幾何学的な構造に起

因して付加する位相である。これまでの研究は、主に 2 状態系に関する幾何学的位相の研究が中心であった。本研究ではより一般的な 3 状態系に関する幾何学的位相を考え、2 状態系の幾何学的位相には見られない特性を実験により明らかにした。

本研究では、2 光子の組の偏光状態を対象とした。このような系は、3 状態系と考えることができる。このような場合でも、幾何学的位相は、3 つの状態を決めると特定される。3 状態系の 3 つの量子状態は、ブロッホ球上の 4 つの点で特徴づけられ、その幾何学的位相は 4 つの点から形成され 1 つの辺を共通とする 2 つの三角形の面積の和で表されることが我々の過去の研究より分かっている。この理論的考察を、時間反転光学系を用いた光子対の偏光測定により実験的に明らかにした。実験では、同じ偏光の 2 光子からなる状態を 2 種類 ($|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle$) 用意し、干渉計を用いてその重ね合わせ状態を作る。そして事後選択により状態 $|\psi_3\rangle$ に射影する測定を行う。ここで、得られる干渉信号の位相のずれとして幾何学的位相が観測される。

まず、最終状態 $|\psi_3\rangle$ が同じ偏光の 2 光子である場合を示す。この場合、ブロッホ球上に量子状態を表すと、図 4 (a) のようになる。この場合は、4 つ目の点は縮退するため 3 つの点で表され、幾何学的位相は、三角形の面積の 2 倍と関係付けられる。この実験では、図中のパラメータ θ を固定し、もう一つのパラメータ ϕ を変化させることで、3 つ目の量子状態をブロッホ球上で掃引し、幾何学位相の変化を観測した。実験結果を同図(b)に示す。幾何学的位相は、三角形の面積に増加と共に増大する。特に、 θ が小さいときには、 $\phi = 180^\circ$ 付近で幾何学的位相が大きく変化している。この特性は、同図(a)の三角形の面積の変化に見て取れる。

次に、最終状態を同一でない光子の組として、同様の実験をした。この場合の、量子状態

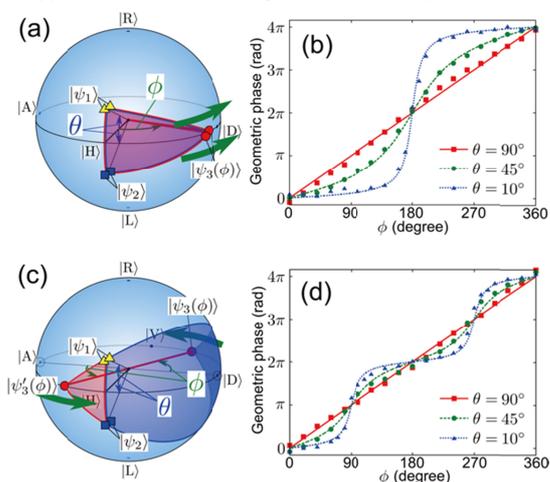


図 4 最終状態が同じ偏光の光子からなる場合の幾何学的位相の(a)ブロッホ球表現と(b)実験結果。最終状態が異なる偏光の光子からなる場合の幾何学的位相の(c)ブロッホ球表現と(d)実験結果。

のブロッホ球表現を図 4(c)に、幾何学的位相の測定結果を(d)に示す。この場合は、最終状態に対応するブロッホ球上の点は(c)の赤点のように 2 点で表される。そして、幾何学的位相は、赤と青で示した 2 つの三角形の面積と関係付けられる。この場合、パラメータ ϕ を変化させると、赤点がブロッホ球の赤道を同時に移動するため、2 箇所ですべて異なる変化をすることが予想される。実際、観測された幾何学的位相は、同図(d)のように 2 箇所ですべて大きく変化している。このような、2 点での幾何学的位相の非線形変化は、従来の 2 状態系での幾何学的位相には表れない高次元の幾何学的位相特有の現象といえる。この成果に関しては、論文 [Phys. Rev. A, 91, 062118 (2015)]に掲載されている。

5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 6 件)

- [1] K. Ogawa and M. Kitano, “Classical realization of dispersion-canceled, artifact-free, and background-free optical coherence tomography,” *Opt. Express* 24, 8280-8289 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.008280, 査読有.
- [2] Y. Turek, H. Kobayashi, T. Akutsu, C. Sun, and Y. Shikano, “Post-selected von Neumann measurement with Hermite–Gaussian and Laguerre–Gaussian pointer states,” *New Journal of Physics*, 17, 083029 (2015). DOI: 10.1088/1367-2630/17/8/083029, 査読有.
- [3] K. Ogawa, S. Tamate, H. Kobayashi, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Observation of nonlinear variations in a three-vertex geometric phase in a two-photon polarization qutrit,” *Phys. Rev. A*, 91, 062118 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevA.91.062118, 査読有.
- [4] K. Ogawa, S. Tamate, T. Nakanishi, H. Kobayashi, and M. Kitano, “Classical realization of dispersion cancellation by time-reversal method,” *Phys. Rev. A*, 91, 013846 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevA.91.013846, 査読有.
- [5] H. Kobayashi, K. Nonaka, and Y. Shikano, “Stereographical visualization of a polarization state using weak measurements with an optical-vortex beam,” *Phys. Rev. A*, 89, 053816 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevA.89.053816, 査読有.
- [6] K. Ogawa, S. Tamate, H. Kobayashi, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Time-reversed two-photon interferometry for phase superresolution,” *Phys. Rev. A*, 88, 063813 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevA.88.063813, 査読有.

(学会発表)(計 24 件)

- [1] T. Fujimoto, H. Kobayashi, and K. Iwashita “Improvement of depth resolution in optical

coherence tomography of dispersive medium with multiple reflections,” Asia Communications and Photonics Conference, 22 Nov. 2015, Hong Kong Conference and Exhibition Centre, Hong Kong.

[2] H. Kobayashi and Y. Shikano, “Weak measurement formalism for paraxial wave optics,” International Workshop on Weak Value and Weak Measurement, 19 Mar. 2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.

[3] K. Ogawa, S. Tamate, T. Nakanishi, H. Kobayashi, and M. Kitano, “Observation of Geometric Phases in Three-State Systems for Two-Photon Polarization,” QCMC 2014, 4 Nov. 2014, University of Science and Technology of China, China.

[4] K. Ogawa, S. Tamate, T. Nakanishi, H. Kobayashi, and M. Kitano, “Classical Realization of Dispersion Cancellation by Using Transform-limited Pulses,” CLEO 2014, 11 June 2014, San Jose, California, USA.

[5] K. Ogawa, S. Tamate, T. Nakanishi, H. Kobayashi, and M. Kitano, “Classical Realization of Dispersion Cancellation by Time-Reversal Method,” Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, Sep. 2014, OIST Seaside House, Okinawa, Japan.

〔その他〕

量子電磁工学研究室ホームページ(量子計測)

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.php?id=7>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 正雄 (Masao KITANO)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：70115830

(2) 研究分担者

中西 俊博 (Toshihiro NAKANISHI)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：30362461

(3) 研究分担者

小林 弘和 (Hirokazu KOBAYASHI)
高知工科大学・工学部・准教授
研究者番号：60622446