

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32606

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340119

研究課題名(和文) エンタングルメントを利用した量子測定の実証実験

研究課題名(英文) Experimental studies on quantum measurements using entanglement

研究代表者

平野 琢也 (Hirano, Takuya)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：00251330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：パルス光エンタングルメントのリソースとなるパルス光スクイズ状態の生成については、ピコ秒モード同期レーザーを用いたLO光パルスの時間波形整形を初めて実現し、パルス光スクイズングに位相チャープが影響を与えることを示し、パルス光を用いたパラメトリック増幅によるスクイズングでは世界最高の-5dBを達成することができた。これらの結果は、パルスモードホモダイン検出の顕著な改善であり、連続変数エンタングルメントの改善と量子測定の実験的検証につながる成果である。また、本研究の知見を量子情報、特に量子暗号への応用する研究を進め、連続変数量子鍵配送の高速化などの成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We experimentally investigate the temporal characteristics of picosecond squeezed pulses generated via an optical parametric amplification in a periodically poled MgO:LiNbO₃ waveguide. The noise variances for the various time delays between the squeezed pulse and a local oscillator are measured using a balanced homodyne detector. The measured delay dependence is asymmetric, and this asymmetry indicates that the phase chirping of the squeezed pulse is different from that of the local oscillator pulse. We show that the observed squeezing can be improved by using the pulse shaping of the local oscillator. By using a temporally shaped local oscillator in a balanced homodyne detection, we observed the squeezing of -5.0 dB below the shot noise level. To our best knowledge, this is the highest level obtained for waveguide squeezers.

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：スクイズ光 エンタングルメント パラメトリック増幅 周期分極反転光導波路 パルス光 量子測定 量子鍵配送

1. 研究開始当初の背景

20世紀の終わりに活発化し、21世紀に入っても継続している実験技術の進歩により、量子力学のより深い理解と新しい応用が可能になりつつある。本研究計画は、量子力学的な測定の実証実験を行うためにエンタングルメントを利用することを研究課題として行った。量子力学における測定は、古典物理学における測定とは大きく異なる。量子的な測定は、一般に測定対象の状態を変化させ、測定対象について知りうる情報に原理的な限界を与える。このような量子測定についての知見を深めることは、基礎的な物理学として興味深いだけでなく、量子暗号などの様々な量子情報技術の基盤ともなるものである。

2. 研究の目的

本研究の概念図を下図に示す。本研究では、パルス光を用いた連続変数エンタングルメントの生成とパルスモードのホモダイン検出について研究を進めることで、不確定性原理や量子非破壊測定等についての知見を深め、量子力学の基礎の検証や量子情報などへの応用に道を開くことを目的とした。

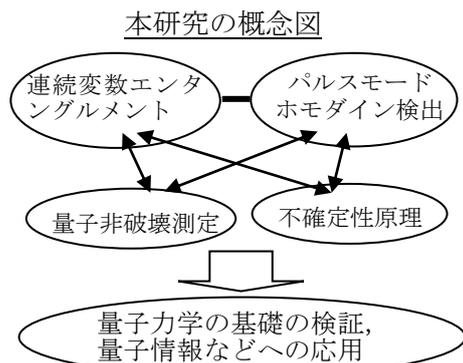


図1 研究概念図

連続変数のエンタングルメントとは、2つのモードの電磁場の直交位相振幅が量子的な相関を持った状態であり、相関が完全な場合は1935年の論文でアインシュタイン・ポドルスキー・ローゼンが議論した状態に対応する状態である。実験的には、2つのスクイーズ光をビームスプリッターで重ね合わせることで実現することができる。連続光の場合、最初の実験は1992年に行われ(PRL.68.3663(1992))、その後、1997年には最初の量子テレポーテーションも実現された(Science 282, 706 (1998).)。一方、パルス光に関しては、2006年に我々が直交位相振幅のエンタングルメントの周波数領域における直接的な検証を初めて行った(Phys. Rev. A 76, 012314 (2007).)。

パルスモードのホモダイン検出は、一つのパルスに対して、一回の直交位相振幅測定を行い、一つの実数測定値を得る微弱光の検出方法である。通常ホモダイン検出が低雑音の電圧増幅器を用い、RFスペクトラムによ

ってサイドバンド周波数成分の揺らぎの大きさを測定するのに対し、パルスモードでは、通常は電荷敏感増幅器を用いることにより、一つのパルスごとに電荷の量をS/N良く増幅する。RFスペクトラムアナライザを用いる場合は、特定の周波数領域でのみ量子雑音限界に達していれば良いのに対し、パルスモードでは測定時間の逆数からパルスの繰り返し周波数までの周波数帯域ですべて量子雑音限界に達している必要があり、特に高い繰り返しのパルス光に対応するには技術的なハードルが高い。最初にパルスモードのホモダイン検出を実現したのはオレゴン大学のグループで、確率分布関数が測定できることを利用して密度行列の測定も行った(PRL70, 001244(1993))。我々は、通信波長帯のスクイーズ光のパルスモード検出に初めて成功したほか(JJAP45,L821(2006))、量子暗号の実験も進めている(PRA68, 042331(2003))。

この2つの新しい手法を組み合わせることで、概念的にも実験手法としても優れた量子測定の実験が可能となると考えられる。すなわち、パルス光の連続変数エンタングルメントを生成し、それをパルスモードのホモダイン検出により相関を確認すると、離れた場所で行うパルス対の測定値の間に相関が見出される。個々の場所での測定値はパルス毎にランダムに大きく変動するが、パルスペア間の測定値の和(あるいは差:位相差に依存する)は小さな変動に止まるという結果が得られる。このことを利用すると、新しい量子測定の実証実験が可能となると期待される。

そこで、本研究では、連続変数エンタングルメント、およびパルスモードホモダイン検出の改善について研究を行い、その知見を量子情報、特に量子暗号への応用する研究を進めた。

3. 研究の方法

連続変数エンタングルメントとパルスモードホモダイン検出の改善を実現するために、本研究では、局部発振光(L0光)パルスの時間整形を行い、スクイーズパルスについて新しい知見を得ることができ、また、パルス光を用いた縮退パラメトリック増幅では世界最高となる5dBのスクイージングを実現することができた。前章で述べたように、2つのスクイーズ光をビームスプリッターで重ね合わせることで連続変数エンタングルメントを生成できるので、スクイージングの改善は、連続変数エンタングルメントの改善に直結する。また、L0パルスの時間整形は、パルスモードホモダイン検出の改善の鍵となる手法である。本研究では、ピコ秒パルスに対する時間波形整形を初めて実現した。以下では、発表論文1,3の内容を中心に、本研究の方法と成果の詳細を述べる。

スクイーズ状態は、量子光学の研究の基本的かつ重要なリソースであり、また、多くの

量子情報技術の実現のためのリソースであり、特に、連続量を用いた量子情報技術にとって、スクイーズ状態は基本となるリソースである。連続光を用いた実験では、良質のスクイーズ状態の生成が既の実現されており、幾つかの重要な量子情報処理実験に応用されている。しかし、連続光では、光子数識別検出器と組み合わせる、より進んだ量子情報処理を行うことは容易ではない。なぜなら、光子数識別器は、連続光の中の特定の時間モードの光子数を、その周りの時間に存在する光子から区別して測定することが困難であるからである。

時間領域の量子情報処理には、パルス光のスクイーズ状態が適しており、光子数識別検出器を用いた非ガウス制御実験も報告されている。しかし、パルス光のスクイーズ状態の量子雑音の圧搾の度合いは、連続光に比べるとまだ不十分であるため、量子情報処理の質の低下が起きてしまっている。そのため、良質のパルス光スクイーズ状態の実現が強く望まれている。

1987年に実現された世界で最初のパルス・スクイーズ光の発生以来(R. E. Slusher *et. al* 1987)、シングルパスのパラメトリック増幅は簡便かつ効果的な手法として用いられている。また、光導波路による空間的な閉じ込め効果を、パルス光の高いピークパワーと併用すれば、高いパラメトリック利得を得ることができる。一方、測定については、パルス光の場合に大きなスクイージングを測定するためには、空間的なモードマッチングだけではなく、時間的なモードマッチングも重要となる。

発表論文3は、ピコ秒スクイーズ光のパルス時間特性について報告したものである。波形整形しないLOパルスとスクイーズパルスの遅延時間を変化させながら直交位相振幅の分散を測定した結果は、これら2つのパルスが異なるチャープ特性を持つことを示すものであった、このことは、パラメトリック利得が高い場合に、なぜ測定されるスクイージングが低下するかを説明し、時間波形整形により、測定されるスクイージングの改善できることを示すものである。

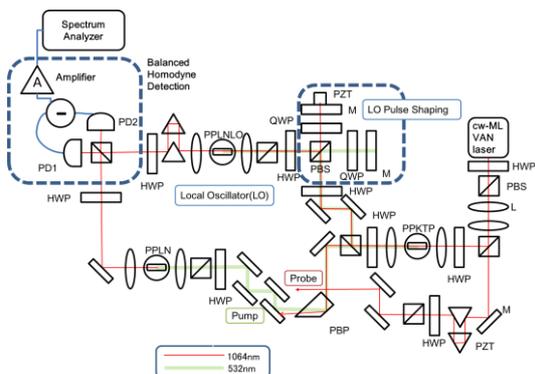


図2 実験配置図

ピコ秒パルスに対する時間波形整形のための実験配置図を図2に示す。光源は、波長1064nmの連続波モード同期Nd:YVO₄レーザーであり、パルス時間幅は7psec、繰り返し周波数は76MHzである。このレーザー光源の第2高調波(波長532nm)を周期分極反転したバルクのKTiOPO₄結晶(PPKTP結晶)で発生し、縮退パラメトリック増幅の励起光として用いる。PPKTP結晶の長さは、発表論文3では5mm、発表論文1では3mmである。長さ3mmのPPKTP結晶を用いた第2高調波の変換効率率は、入射基本波の平均パワーが640mWのとき16%であった。縮退パラメトリック増幅は、周期分極反転した長さ5mmのMgO:LiNbO₃光導波路(PPLN)を用いた。

第2高調波は、図2に示すように、半波長板(HWP)と、2波長に対する偏光ビームスプリッター(PBS)を用いて2つのビームに分け、片方(下側)をスクイーズ状態の発生に用い、もう片方(上側)をLOパルスの時間波形整形に用いた。波形整形のシードパルスには、PPKTPを通り、第2高調波に変換されない基本波の偏光成分を用いた。第2高調波パルスとシードパルスの相対的な遅延時間を調整するために、PBSとそれぞれの波長用1/4波長板を組み合わせた光学系を用いた。水平偏光の基本波シードパルスは最初PBSを透過し、1/4波長板を往復することで偏光面が90度回転し、PBSで反射される。垂直偏光の第2高調波は、最初PBSで反射され、やはり1/4波長板の往復により偏光面が90度回転し、PBSを透過する。基本波シードパルスは、PPLN LO中で縮退パラメトリック増幅され、その際、パルスの中心部分の方が裾の部分に比べて、より増幅されるために、パルス時間幅が狭くなる。パラメトリック利得が+20.5dBのとき、パルス時間幅は1/2.5になる。この時間幅が短くなった基本波を時間波形整形したLOパルスとして用いる。また、シードパルスと同時に入射する第2高調波をブロックし、波形整形しないLOパルスとした。

4. 研究成果

図3は、スクイーズパルスと波形整形しないLOパルスの遅延時間を変化させたときの、スクイーズパルスの直交位相振幅の分散の最大値と最小値をプロットしたものである。図3より、最小の分散値がショット雑音レベルよりも小さくなるのは、遅延時間がゼロ付近のみであることが分かる。また、遅延時間依存性は非対称であり、分散の最小値は、遅延時間が負のときに、より大きくなり、遅延時間が-10psecでは、分散の最小値と最大値が等しくなった。

この非対称な振る舞いは、スクイーズパルスとLOパルスが異なる位相チャープングを持つことを示している。なぜなら、もしも、両者のチャープングが同一であり、時間波形が対称であれば、図3の結果は対称になったはずである。位相チャープングは、非線型結

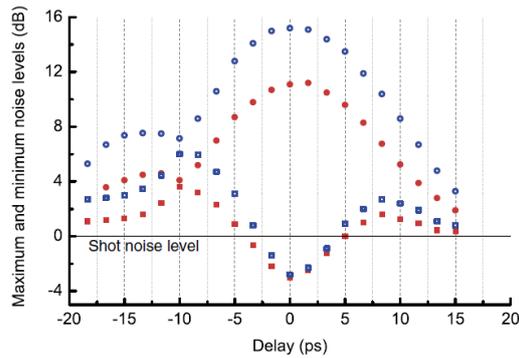


図3 スクイズパルスの直交位相振幅の分散のLOパルスとの遅延時間依存性：青色の白抜きマークは励起光の導波路からの出力が4mWの、赤の塗りつぶしたマークは2.5mWのデータである。

晶中の群速度ミスマッチ等の分散効果によるものである。スクイズパルスは、第2高調波により励起されたPPLN光導波路中で生成され、PPLNの基本波と第2高調波の群速度ミスマッチは、1psec/mmであり、無視できない大きさである。一方、波形整形しないLOパルス光は、非線形光学過程を受けておらず、トランスフォームリミット光パルスを保っており、時間波形は対称のはずである。

位相チャージングが異なる時、スクイズパルスとLOパルスの相対的な位相は、パルスの場所に依存する。相対的な位相が一定でないと、量子雑音が減少した直交位相だけではなく、量子雑音が増加した直交位相も測定してしまう。このとき、量子雑音の減少は、増加した量子雑音により覆い隠されてしまい、ショット雑音レベル以下の量子雑音は観測できなくなる。

図4は、長さ5mmのPPKTP結晶を用いてスクイズングを行ったとき、直交位相振幅の最小の分散の大きさが、励起光強度にどのように依存するかを示したものである。四角いマークは、波形整形しないLOパルスを用いて測定された実験結果であり、励起光強度が3mW以上になると、最小の分散は増加し始め、7mWを超えると、ショット雑音レベルを上回っている。これは、位相チャージングのために、最適の遅延時間(Delay=0)であっても、

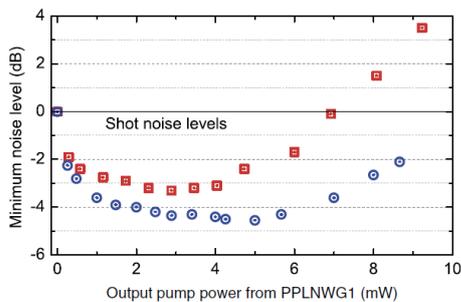


図4 長さ5mmのPPKTPで第2高調波を発生したときのスクイズング：赤の四角は波形整形をしないLOパルスを、青の丸は波形整形したLOパルスを用いた。

パルス間の相対的な位相差が一定ではなく、増加した量子雑音成分も観測してしまっているためと解釈できる。青い丸のマークは、時間波形整形によりパルス時間幅を狭くしたLOパルスを用いたときの測定結果であり、分散値が増加する励起光強度が大きい方向にシフトし、最小の分散値も、ショット雑音レベルより-4.5dBまで小さくなっている。これは、パルス波形のうち、よりスクイズングの大きくなる中心部のみを測定できたためである。

次に、第2高調波発生に用いるPPKTP結晶の長さを5mmから3mmに短くしたときの実験結果を図5に示す。先に述べたように、非線形結晶中の分散により位相チャージングが生じているのであれば、結晶の長さを変えることで、位相チャージングの大きさが変化するはずである。実際に、図4に示した結果とは異なり、パラメトリック増幅の励起光強度を増やしても、最小の分散がある強度を境に増加する現象は測定されないことが分かる。また、時間波形整形したLOパルスを用いたとき、最大で-5dBのスクイズングが観測され、これは我々の知る限り、パルス光ではこれまでで最良の結果である。

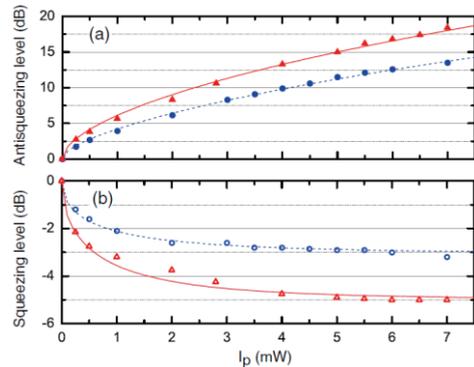


図5 長さ3mmのPPKTP結晶を用いたときのスクイズングの結果：青丸は時間波形整形しないLOパルスを用いた場合、赤三角は波形整形したLOパルスを用いた場合。

以上、本研究では、ピコ秒モード同期レーザーを用いたLO光パルスの時間波形整形を初めて実現し、パルス光スクイズングに位相チャージングが影響を与えることを示し、パルス光を用いたパラメトリック増幅によるスクイズングでは世界最高の-5dBを達成することができた。これらの結果は、パルスモードホモダイン検出の顕著な改善であり、連続変数エンタングルメントの改善と量子測定の実験的検証につながる成果である。不確定性原理や量子非破壊測定の実験的研究は、残念ながら、光源の度重なる故障のために十分な成果を上げることはできなかった。しかし、連続変数エンタングルメント、およびパルスモードホモダイン検出の知見を量子情報、特に量子暗号への応用する研究を進め、繰り返し周波数10MHzで動作する

連続変数量子鍵配送の実現や安全性解析の新しい知見を得て、学会発表などで報告を行った。これらの成果の詳細は雑誌論文として公表する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Yujiro Eto, Akane Koshio, Akito Ohshiro, Junichi Sakurai, Keiko Horie, Takuya Hirano, and Masahide Sasaki, Efficient homodyne measurement of picosecond squeezed pulses with pulse shaping technique, *Optics Letters* 36, 4653-4655 (2011). 査読有
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.004653>
2. 平野琢也, 現代に至るまでの量子力学, 数理科学, No.584, p.55-60, 2012年2月号. 査読無
3. Yujiro Eto, Akane Koshio, Akito Ohshiro, Yun Zhang, Masahide Sasaki, and Takuya Hirano, Temporal Characteristics of Pulsed Squeezing in a Nonlinear Optical Waveguide, *Japanese Journal of Applied Physics* 52, 048001 (2013). 査読有
doi:10.7567/JJAP.52.048001
4. 平野琢也, 2012年ノーベル物理学賞と共振器 QED の進展, レーザー学会誌レーザー研究「共振器量子電気力学 (QED) の進展」特集号レーザー学会創立 40 周年記念, Vol. 41, No. 7, pp475-478 (2013). 査読無
5. 平野琢也, 黒体輻射, 数理科学, No.597, p.36-41, 2013年3月号, 査読無
[学会発表] (計 14 件)
1. 小塩あかね, 衛藤雄二郎, 櫻井潤一, 堀江恵子, 平野琢也, 時間幅の短い局部発振光を用いたピコ秒パルス光スクイーミングの観測, 第 24 回量子情報技術研究会 (QIT24) (東京工業大学, 2010年5月12日~13日).
2. M. Yoshimura, T. Sugaya, T. Hirano, K. Kikuchi, K. Sugiura, S. Kurimura, and H. Nakajima, Generation of pulsed squeezed light at telecommunication wavelength using a high efficiency PPLN optical waveguide, CLEO/Europe- EQEC 2011 (ICM - International Congress Centre, Munich, Germany, 22-26 May 2011).
3. 中村圭記, 三内崇正, 田中創吾, 松田陵平, 平野琢也, 低損失光導波路を用いた通信波長帯パルス光スクイーミング, 日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学, 2011年9月21日~24日, 富山大学).
4. 衛藤雄二郎, 櫻井潤一, 堀江恵子, 小塩あかね, 大城亮人, 佐々木雅英, 平野琢也, CW モード同期レーザーと光導波路を用いたスクイーズド光の生成(III), 日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学, 2011年9月21日~24日, 富山大学).
5. 中村 圭記, 三内 崇正, 田中 創吾, 松田 陵平, 平野 琢也, 低損失光導波路を用いた通信波長帯パルス光スクイーミング, 応用物

- 理学会・量子エレクトロニクス研究会「非線形光学 50 年 その基礎と材料・デバイスおよび応用」(上智大学軽井沢セミナーハウス, 2011年12月9日(金)~11日(日)).
6. Tsubasa Ichikawa, Yoshifumi Koike, Kazuhiko Murayama and Takuya Hirano, Continuous-Variable QKD with Discrete Modulations and Post-Selections, 2nd Annual Conference on Quantum Cryptography (QCRYPT 2012), National University of Singapore, (September 10-14, 2012).
 7. 市川翼, 村山和弘, 平野琢也, 離散変調連続変数量子鍵配送プロトコル entangling cloner 攻撃のもとでの鍵生成率について, 第 27 回量子情報技術研究会, 慶應義塾大学, (2012年11月27日~28日).
 8. 市川翼, 鶴丸豊広, 平野琢也, Conditional squashing model とその直交位相振幅測定への応用について, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, (2013年3月26日~29日).
 9. 小栗雄介, 佐藤壮介, 羽田昌也, 小池恭史, 宮崎淳, 市川翼, 平野琢也, 連続変数量子鍵配送の高速動作, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, (2013年3月26日~29日).
 10. Takuya Hirano, Quantum technologies with bosons, Quantum Science Symposium Asia-2013, Sanjo Conference Hall, University of Tokyo Hongo Campus, Tokyo, JAPAN (2013年11月25日~26日).
 11. Yusuke Oguri, Tsubasa Ichikawa, Vanou Ishii, Takuya Hirano, Lightweight implementation of four-state CV-QKD protocol over 10km optical fiber, Quantum Science Symposium Asia-2013, Sanjo Conference Hall, University of Tokyo Hongo Campus, Tokyo, JAPAN (2013年11月25日~26日).
 12. Tsubasa Ichikawa, Yusuke Oguri, and Takuya Hirano, Implementing Continuous Variable Quantum Key Distribution with Discrete Modulations, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Hongo campus of The University of Tokyo, (2014年1月27日~30日).
 13. 市川翼, 平野琢也, 受信器の雑音と透過率を取り入れた連続変量子暗号の安全性解析, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, (2014年3月27日~30日).
 14. 戸川翔太, 中川大貴, 衛藤雄二郎, 平野琢也, 樫田拓也, 栗村直, 中島啓機, 高効率周期分極反転光導波路を用いた通信波長帯パルス光のスクイーミング II, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, (2014年3月27日~30日).
6. 研究組織
(1) 研究代表者
平野 琢也 (HIRANO TAKUYA)
学習院大学・理学部・教授
研究者番号: 00251330