

超短パルスレーザーを用いた光の量子状態の制御
—時間領域量子テレポーテーションの実現—（継続-16）
 Manipulation of optical quantum states using ultra short pulses
 —Toward realization of time-domain quantum teleportation—

平野 琢也 学習院大学
 Takuya Hirano Gakushuin University

桑本 剛
 Takeshi Kuwamoto
 学習院大学
 Gakushuin University

研究期間 平成 13 年度～平成 17 年度

概要

本研究開発の基本的な目標は、パルス光を用いてスクイズド光および量子もつれ合いを生成し、パルス光を使った連続変数の量子テレポーテーションを実現することである。パルス光の高い瞬間強度を利用して、シングルパスのパラメトリック増幅でスクイズド光を発生する。広帯域スクイズド光では、一つ一つのパルスを区別するパルス毎のホモダイン検出を行うことにより、1つのパルスを1つのモードとみなす量子通信プロトコルへの応用が可能となる。具体的な実験としては、光源として半導体レーザー励起のパルスレーザーを用い、非線形媒質として周期分極反転した非線形結晶を用いる手法の可能性を追求する。パルス毎の量子テレポーテーションは、ホモダイン検出を用いる量子暗号の長距離化に結びつくので、ホモダイン検出を用いる量子暗号に関する研究も平行して進める。

Abstract

The purpose of the present study is to generate squeezed states of light and continuous-variable quantum entanglement using pulsed light, and to realize pulsed continuous-variable quantum teleportation. Squeezed light is generated via single-pass parametric amplification taking advantage of the high peak power of pulsed light. By combining pulsed homodyne detection with broadband squeezed light, continuous-variable quantum communication protocol in which individual pulse is regarded as a single mode will become possible. Quantum key distribution using pulsed homodyne detection is also investigated.

1. まえがき

本研究の目的は、時間幅の短いパルス光と導波路デバイスを用いることにより、光の量子状態を制御し、量子もつれ合いの生成および量子テレポーテーションを実現することである。質の高い量子絡み合いを効率よく生成するための本研究の基本的な戦略は、時間幅の短いパルス光と導波路デバイスを用いることである。また、平衡型ホモダイン検出を用いる量子暗号の実証実験等を行う。

2. 研究内容及び成果

光の量子状態を制御する実験では、 -3.2dB のスクイーミングに成功した。導波路型非線形デバイスを用いた実験では、 30dB 以上の古典的なパラメトリック利得の実現し、 10dB を超えるアンチスクイーミングと -2.7dB スクイーミングを観測することができた。観測されるスクイーミングの大きさを制限しているのは、スクイズド光と局部発振光の相対的な位相揺らぎと考えられるので、生成したスクイズド光は 10dB 以上の真空雑音の圧搾が実現されていると推測される。さらに2つの導波路を用いて2つのスクイズド光を発生し、これらを重ね合わせることでパルス光連続変数エンタングルメントの生成および確認に初めて成功した。これらの実験に用いたレーザーの波長は $1.06\mu\text{m}$ である。

通信波長帯の実験では、周期分極反転した LiNbO_3 光導波路を用いた光パラメトリック利得の測定で、 -5.7dB のパラメトリック減衰を実現し、さらに -2.6dB というパルスモードホモダインでは最も大きなスクイーミングの観

測にも成功することができた。

ホモダイン検出を用いる量子暗号については、これまで原理検証実験や安全性に関する理論的な研究を行い多くの知見を得ることができた。光ファイバーを量子通信路とするプラグアンドプレイ方式と、自由空間を通信路とする同軸光学方式という 2 つの方式で連続変数量子鍵配送を実現した。

2.1. ピコ秒近赤外エンタングル光の発生

この節では、連続変数エンタングルメントの生成実験について述べる。この実験では、2つの導波路を用いて2つのスクイズド光を発生し、この2つのスクイズド光をビームスプリッタで重ね合わせ、エンタングルメントの生成を行った。2つのスクイズド光を重ね合わせる際の相対的な

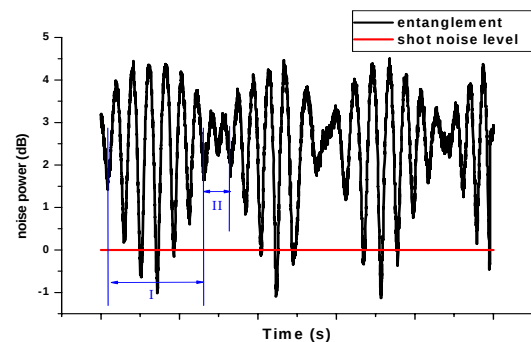


図1 エンタングルビームの量子揺らぎ

位相を掃引しながら、片方の出力光の直交位相振幅をホモダイン検出器で測定した結果を図1に示す。スクイズド光の相対的な位相の掃引に比べて、局部発振光の位相掃引を高速に行っている。図1のIの領域では、ビームスプリッタからの出力光は位相に依存した揺らぎを持っており、1dB程度のスクイズングが観測された。図2のIIの領域では、出力光の揺らぎは位相に依存しなくなっており、エンタングルしたビームが発生している相対位相、すなわち、2つのスクイズド光の位相が互いに 90° ずれて重ね合わせている相対位相となっている。次に、スクイズド光の間の相対位相をIIの領域に固定し、2つのエンタングルビーム間の揺らぎの和の相関を調べたところ、和の揺らぎの大きさは量子雑音限界を下回ることが観測された。これにより、パルス光によるパラメトリック増幅で連続変数エンタングルメントの生成実験に世界で初めて成功した。

2.2. 通信波長帯でのスクイズド光の発生

LiNbO₃光導波路を使用したスクイズド光発生の実験で問題となることの一つに、導波路の出力ビームの空間的なプロファイルをきれいにすることが難しいことがある。入射ビームの最適化などを試みても、現在用いている市販の導波路では、理想的な出力ビームを得ることがなかなかできない。この原因としては、導波路としての不完全性や光によるダメージの影響が考えられるが、これらは光源となるレーザー光の波長が長くなると、その影響が相対的に小さくなることが期待される。また、導波路中の光損失についても、長波長の方が有利と推測される。さらに、通信波長帯でスクイズングを実現することは、光通信への適用を考えると非常に重要である。

本研究で用いた光源は、受動QスイッチErドープガラスマイクロレーザー(Cobolt 製 Tango)であり、波長は1535nm、パルスの繰り返しは約5KHz、パルス時間幅3~5nsec、平均出力がおよそ35mWという低消費電力(1W)かつ小型のレーザーである。パルスあたりのエネルギーは5μJ、ピークパワーはおよそ1kWとなり、2.1節の実験で用いているピコ秒モード同期レーザーとはほぼ同程度のピークパワーがある。但し、揺らぎの検出にはパルス毎のホモダイン検出(pulse homodyne detection)を行っていることが本実験のもう一つの大きな特徴である。

実験では、まず一つの周期分極反転LiNbO₃導波路で第2次高調波を発生し、これを励起光として用いて、2つめのPPLN導波路でパラメトリック増幅を行った。一つめのPPLNから出力される変換されなかった基本波をそのまま同軸で2つめのPPLN導波路に入れ、パラメトリック増幅のプロブ光として用いた。平行平板のガラス板を斜めにビームに入れ、その角度を変えることでガラス中の光路長を変えることで、第2次高調波とプロブ光の相対的な位相を変化させた。相対的な位相を変えていくと、プロブ光の出力強度は、励起光が無いときに比べて、プロブ光の増減が測定される。我々は本光学系でパラメトリック減衰を制限している原因について検討を行い、第2次高調波発生過程でプロブ光の時間波形が乱れていることを見出した。そこで、プロブ光として、第2次高調波発生に関わらなかった光を用いることで、5.7dBの減衰を実現することができた。さらに、同軸光学系を用いて、スクイズングの測定を行った。局部発振光には垂直偏光の基本波を用いて、水平偏光のスクイズド光の直交位相振幅をpulsed homodyne detectionにより測定した。スクイズド光のある直交位相振幅の揺らぎが2.6dBだけ量子雑音レベルよりも小さくなることをpulsed homodyne

detectionにより確認することができた。我々の知る限りにおいて、通信波長帯でパルスモードのスクイズングが実現されたのは初めてである。

3. むすび

時間幅の短いパルス光と導波路デバイスを用いることにより、光の量子状態を制御し、量子もつれ合いの生成を行うことができた。これにより、今後古典通信路の整備を行えば時間領域の量子テレポーテーションを実現できる技術を開発することができた。

方法としては、2次の非線形光学過程を用いて光のスクイズド状態を生成した。古典的なパラメトリック増幅の利得やアンチスクイズングの度合いから、生成したスクイズングの度合いは10dBを超えていると推測される。しかしながら、観測されたスクイズングの度合いはそれよりも小さく、これは局部発振光とスクイズド光の相対的な位相の不安定性といった測定の不完全さが原因であると思われる。そして、2つのスクイズド光をビームスプリッタで混ぜ合わせることで量子もつれ合いを生成した。

また、従来の連続光を用いた実験とは異なり、パルス一つの量子状態を測定するpulsed homodyne detectionにより通信波長帯のスクイズングを測定することができた。平衡型ホモダイン検出を用いる量子暗号の安全性についての理論的な研究を行い、過剰雑音がない場合には、損失がどんなに多くても(距離がどんなに遠くても)post-selectionのしきい値を上げることで安全な鍵を生成できることを示した。

また、過剰雑音が存在する場合には、例えば、古典テレポーテーション攻撃を考慮すると、安全であるためには過剰雑音と損失に一定の条件がつくことなどの知見を得た。古典テレポーテーション攻撃は、コヒーレント状態を送信する連続変数量子暗号全てに適用可能であるので、非常に重要な盗聴方法である。また、実用を目指した実装実験を行った。

【誌上発表リスト】

- [1] T. Hirano, K. Kotani, T. Ishibashi, S. Okude, T. Kuwamoto, "3dB squeezing by single-pass parametric amplification in a periodically poled KTiOPO₄ crystal", Opt. Lett. vol.30 Issue 13 pp1722-1724 (2005年7月1日)
- [2] R. Namiki and T. Hirano, "Practical Limitation for Continuous-Variable Quantum Cryptography using Coherent States", Phys. Rev. Lett. Vol.92 No.11 pp117901-1-7 (2004年3月16日)
- [3] T. Hirano, H. Yamanaka, M. Ashikaga, T. Konishi, and R. Namiki, "Quantum cryptography using pulsed homodyne detection", Phys. Rev. A Vol.68 No.4 pp042331-1-7 (2003年10月29日)

【申請特許リスト】

- [1] 阿部謙司, 平野琢也, 川元洋平, 量子暗号通信方法、および量子暗号通信装置、日本、特願2004-094658号、2004年3月29日
- [2] 川元洋平, 並木亮, 平野琢也, 量子暗号通信方法、および量子暗号通信装置、並びに量子暗号通信システム、日本、2004年10月
- [3] 平野琢也, 量子暗号通信方法及び量子暗号通信装置、日本、2005年2月22日