

フェムト秒 1.5 μm SOPO を用いた非対称 Sagnac ループによる光子数スクイージング発生

Amplitude Squeezing from an Asymmetric Sagnac Loop Fibre Using 1.5 μm Optical Pulses from a FemtoSecond Optical Parametric Oscillator

廣澤賢一(D2), 潮英岳(B4)

K. HiroSawa, H. Ushio

Abstract

We constructed an 1.5 μm femtosecond optical parametric oscillator pumped by a Ti:sapphire laser and performed photon number squeezing experiment at 1.5 μm with an asymmetric Sagnac loop fibre pumped by OPO. We obtained the amplitude squeezing of $>-1.6\text{dB}$ with 150 fs laser pulses. The squeezing was improved to $>-3.1\text{dB}$ with longer input laser pulses.

1 はじめに

量子情報通信や量子コンピュータの研究において、単一光子あるいは連続変数を用いた量子もつれは不可欠な量子情報伝達リソースである。スクイーズド光はこの連続変数の量子もつれを生成することが可能である。従って、我々はパルス連続変数のもつれ合い光源を用いた量子テレポーテーションなどの量子情報処理の実現を目指し、光ファイバによる波長 1.5 μm 帯でのスクイーズド光の発生実験を行っている。光ファイバのような通信用光学素子で効率よくスクイーズド光、および量子もつれ合い状態を生成することができれば、この分野の発展に大きく寄与できると考えられる。

1.5 μm 帯のパルスレーザには、エルビウム添加ファイバを用いたファイバレーザがあり、簡便で安定であるため、通信の分野ではよく使われているが、ASE (Amplified Spontaneous Emission)による雑音の問題となり、スクイーズド光生成には向いていない¹。そこで我々は 1.5 μm 帯のコヒーレンスの良いパルスレーザとしてフェムト秒 Ti:Sapphire をポンプ光に用いた光パラメトリック共振器 (OPO)を構築し²、これを用いて 1.5 μm 帯のスクイーズド光発生実験を行った。

我々の目的は光パラメトリック共振器(OPO) から得られた 1.5 μm 帯の光パルスを対称な Sagnac ループファイバ³に入射することで直交位相スクイーズド光を得ることであるが、その準備を兼ねて光子数スクイーズド光発生実験を行

った。直交位相スクイーズド光は導波性 Brillouin 散乱の影響で光子数スクイーズド光発生に比べて困難である⁴。また、光子数雑音測定は直交位相振幅の雑音測定と異なり、スクイーズド光と LO の干渉が不要であり、実験的にも容易である。

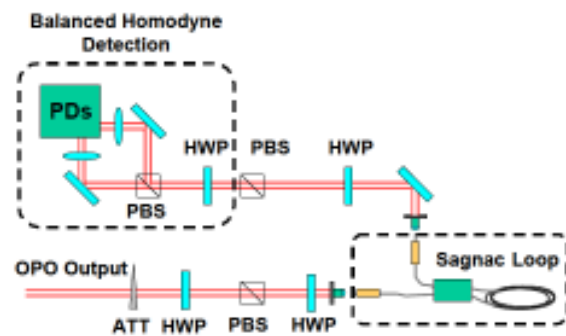


Fig.1: Conceptual diagram of the photon number squeezing experiment using asymmetric Sagnac fibre loop. ATT: Attenuator, HWP: Half Wave Plate, PBS: Polarization Beam Splitter.

2 実験

実験セットアップを Fig. 1 に示す。使用した Sagnac ループファイバは分岐比が可変のビームスプリッタの役割をするカップラがついており、入射した光パルスは右回りと左回りに分かれる。光子数スクイーズド光発生実験では、この分岐比を 93:7 にすることで、効率的な光子数雑音の圧搾が可能となる⁵。右回りと左回りに分かれた光パルスはそれぞれ異なる量の Kerr 非線形効果を受けながら伝搬し、カップラで干渉する。このとき、光パルスが入射していないほうのファイバから光子数スクイーズド光が得られる。スクイーズド光はホモダイン計測で計測するが、ショットノイズは 2 つのフォトダイオードに等しい光量を入射したときの差電流の雑音として計測し、光子数ノイズはホモダイン計測器の前の 1/2 波長板を回転させることで、片

方のフォトダイオードに全光量を入射して、その出力で計測した。一般に光子数雑音の測定を行う際は2つのフォトダイオードの和電流を計測するが、これはショットノイズと量子効率を合わせるためである。我々のホモダイン測定用フォトダイオードは差電流が出力されるように回路を組み込んであったため、このような処置をとった。

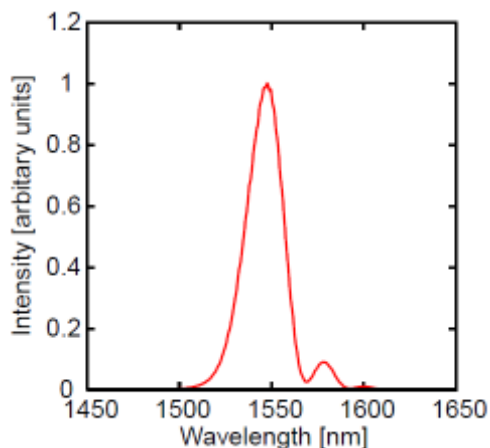


Fig.2: Example of output spectrum from our OPO without birefringence filter. Spectrum width corresponds to ~ 3 nm (FWHM).

2.1 複屈折フィルタなしの場合

我々はまず、複屈折フィルタを用いないで OPO を駆動し、得られたパルスを用いて光子数スクイズド光発生実験を行った。光パルスのスペクトルを Fig. 2 に示す。スペクトル幅は ~ 23 nm であり、これはフーリエ限界パルスでは ~ 150 fs に相当する。Sagnac ループファイバはループ長が 30 m ほどあるが、これは 150-fs のパルスの場合 1 ソリトン長が 50 cm \sim 60cm であるため、50 \sim 60 ソリトン長に相当する。このときの光子数雑音とファイバ入射パワーを Fig. 3 に示す。ただし、ファイバ入射パワーの直接的な測定は困難である。これは、右回りと左回りのパルスがカップラで干渉するとき、入射した光の強度によって受ける非線形位相変調の量が変わり、入射した光の強度とスクイズド光の強度の関係には干渉縞のような波が見られるためである。この干渉縞は光子数スクイズド光発生の原理であり、取り除くことは不可能である。従って、あらかじめカップラを 100:0 とし、ファイバに入射する前の光強度と、出射してきた光強度の関係を測定し、入射する前の光強度から入射パワーを計算している。この入射パワーに対して光子数雑音は大きく上下に変動し、最大で -1.6 dB のスクイ

ジングが得られた。

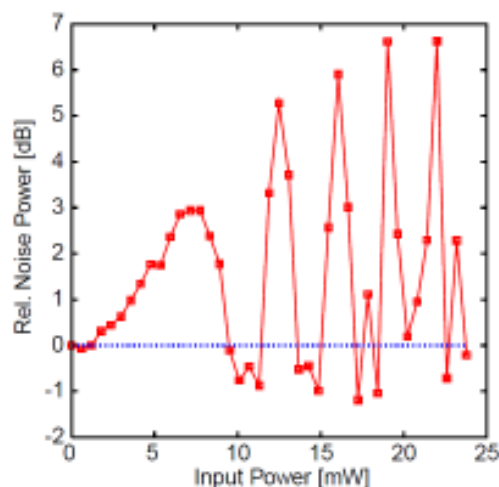


Fig.3: Photon number noise normalized by shot noise level (SNL) dependence on input power. Photon number squeezing was observed below the dotted line.

2.2 複屈折フィルタありの場合

この -1.6 dB という値は文献値⁵と比較すると決して高い値ではない。その原因として考えられるのが、ファイバループ長が 50 \sim 60 ソリトン長と長く、それだけ大きな位相変調を受けている点である。この手法による光子数スクイズド光発生の原理は干渉を用いているため、Kerr 効果などにより、スペクトルが変化すればするほど、元の理論からは遠ざかってしまう。そこで、我々はファイバループ長が 2 \sim 3 ソリトン長となるよう、OPO から発生するパルスのスペクトル幅を複屈折フィルタにより狭めることにした。そのスペクトルを Fig. 4 に示す。中心波長は 1513 nm でスペクトル幅は 5 nm (FWHM)であった。これはフーリエ限界パルスにおいて ~ 700 fs に相当する。この条件ではソリトン長がおよそ 12 m となり、ループ長を 2 \sim 3 ソリトン長とする目的を達成できた。このときの光子数雑音とファイバ入射パワーを Fig. 5 に示す。これにより最大 -3.1 dB のスクイージングが得られた。なお、文献値⁵では最大 -3.9 dB のスクイージングが得られている。Figure 3 と比較すると、入力強度に対して光子数雑音は同じように波打っているが、スクイージングの量は大きく異なり、パルス幅に光子数スクイズド光発生が大きく依存することが示された。また、グラフは最大値で止まっているが、これは当時、12 mW 前後(~ 1.7 ソリトン強度)しか光パワーが入射できなかったため、さらに光強度を強くすると、より高い

スクイージングが得られる可能性もある。

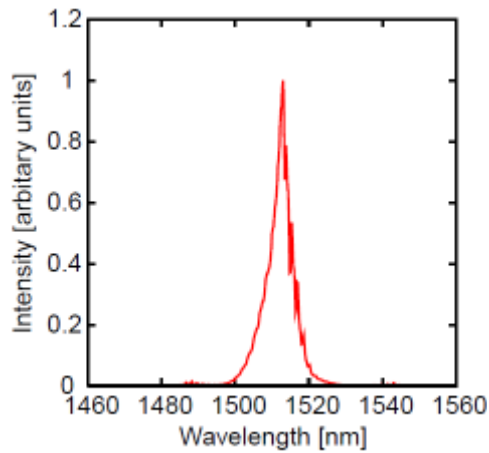


Fig.4: Output spectrum from our OPO without birefringence filter. Spectrum width corresponds to ~ 5 nm (FWHM).

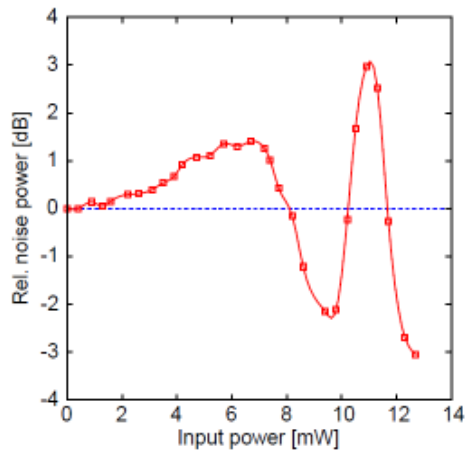


Fig.5: Photon number noise normalized by SNL dependence on input power. Photon number squeezing was observed below the dotted line.

3 まとめ

我々は自ら構築したOPO から得られた1.5 μm 帯パルス

光源を、非対称Sagnacファイバリングに入射することで光子数スクイズド光を発生させることに成功した。この光子数スクイズド光発生法はパルス幅に大きく依存することがわかり、スペクトル幅が ~ 23 nmの時は最大で -1.6dB 、スペクトル幅が ~ 5 nmの時は最大で -3.1dB の光子数スクイージングが得られた。ここで得られた技術や知見は次の目標である直交位相スクイズド光発生実験でも生かされるのではないかと考えられる。

References

1. 田口修平, 廣澤賢一, 百瀬嘉則, 藤原悠二, 神成研究室 Annual Report 2006-2007, 65.
2. 廣澤賢一, 神成研究室 Annual Report 今年度の拙著.
3. M. Rosenbluh and R. M. Shelby, Phys. Rev. Lett. **66** 153 (1991).
4. R. M. Shelby, M. D. Levenson, and P. W. Bayer, Phys. Rev. B **31**, 5244 (1985).
5. S. Schmitt, J. Ficker, M. Wolff, F. König, A. Sizmann, and G. Leuchs, Phys. Rev. Lett. **81**, 2446 (1998).