

フェムト秒レーザ非線形ファイバ干渉計を用いた
光子数スクイーミング、真空スクイーミング、偏光スクイーミングの比較
**Comparison among photon number squeezing, polarization squeezing and squeezed vacuum
generated by femtosecond laser nonlinear optical fiber interferometer**

佐々信介(M1), 伊東泰幸(M2)

S.Sassa and Y.Ito

• Abstract

Fiber nonlinear interferometer driven by femtosecond laser pulses can generate three-different squeezed pulses: (1) photon-number squeezing, (2) quadrature squeezed vacuum, and (3) polarization squeezing. We experimentally generate these three squeezed pulses with a common fiber interferometer and compare the squeezing levels.

1. はじめに

光ファイバの三次非線形光学効果を用いたスクイズド光生成は量子情報通信や量子情報処理の実現に向けて必要な連続量量子もつれ合い状態光を発生させる有効な手法である。ソリトン光パルスの光ファイバ伝播は長距離にわたって自己位相変調を享受できるため高いスクイーミング発生が可能である。自己位相変調効果によって生じる位相平面上でのスクイーミングをいかに評価するかによって、我々は3種類のスクイズド状態を発生可能である。すなわち、光子数スクイーミング[1], 真空スクイーミング[2], 偏光スクイズド光[3]である。光子数スクイーミングは計測が容易であるが、量子もつれ光の評価において位相方向の評価が容易ではない。電場の直交位相振幅成分の揺らぎを圧搾した直交位相スクイズド光の中でも真空スクイズド(SV)光, および, 偏光ストークスパラメータのゆらぎを圧搾した偏光スクイズド光は, 連続量量子もつれ光パルス発生に有用である。今回, 我々はこれらの違う種類のスクイズド光を同一のファイバ干渉計を用い, かつ同じ条件のレーザーパルスで測定し比較を行った。実験には, 1550 nm フェムト秒パルスレーザを光源に用い, ファイバによる非線形偏光干渉計(NOPI: Nonlinear Optical Polarization Interferometer)を用いた。

2. 偏光スクイーミング理論

量子ストークス演算子は以下のように表現される。

$$\begin{aligned}\hat{S}_0 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x + \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y = \hat{n}_x + \hat{n}_y = \hat{n} \\ \hat{S}_1 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x - \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y = \hat{n}_x - \hat{n}_y \\ \hat{S}_2 &= \hat{a}_x^\dagger \hat{a}_y - \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_x \\ \hat{S}_3 &= i(\hat{a}_x^\dagger \hat{a}_x - \hat{a}_y^\dagger \hat{a}_y)\end{aligned}$$

ただし \hat{a}_{xy} および \hat{a}_{xy}^\dagger はそれぞれの偏光に対応した光子の生成消滅演算子である。 \hat{n}_x および \hat{n}_y はそれぞれのモードの光子数演算子であり, \hat{n} は全体の光子数演算子である。

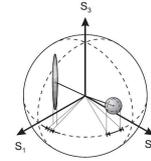


Fig.1 The Poincaré sphere with a coherent state (sphere) and a polarization squeezed beam (cigar).

このとき, 交換関係は以下ようになる。

$$\begin{aligned}[\hat{S}_0, \hat{S}_j] &= 0, \quad j=1,2,3 \\ [\hat{S}_1, \hat{S}_2] &= 2i\hat{S}_3\end{aligned}$$

不確定性関係による分散は以下のように表現される。

$$V_1 V_2 = \langle \hat{S}_3^2 \rangle, \quad V_3 V_1 = \langle \hat{S}_2^2 \rangle, \quad V_2 V_3 = \langle \hat{S}_1^2 \rangle$$

ただし V_j はストークスパラメーターの分散を表し

$$V_j = \langle \hat{S}_j^2 \rangle - \langle \hat{S}_j \rangle^2$$

偏光スクイーミングはストークスパラメーターのゆらぎがコヒーレント状態よりも小さくなるだけでなく最少不確定性も下回る必要がある。よって次式の条件が必要となる。

$$V_j < V_j^{coh} = \langle \hat{n} \rangle$$

さらに次式の条件が必要となる。

$$V_j < \langle \hat{S}_i \rangle < V_k$$

3. 実験

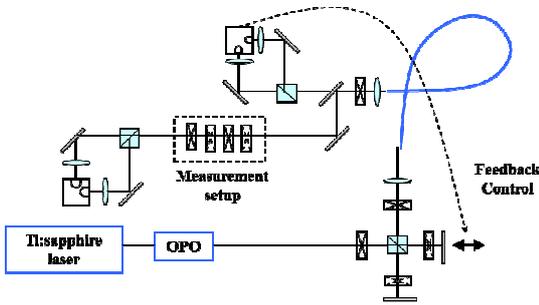


Fig.2 Experimental setup

実験セットアップを Fig.2 に示す。光源に用いたレーザーはフェムト秒パルスレーザー(Spectra Physics 社製 MaiTai)励起 OPO で中心波長 1550 nm, 繰り返し周波 80MHz, スペクトル幅 15 nm(FWHM)である。使用したファイバはボータイ型偏光面保持ファイバー (HB1500G; 長さ 3m) である。Table.1 にファイバの諸特性を示す。

Table.1 Fiber parameters

	HB1500G
コア系 [μm]	7.9
非線形係数 [ps^2/mm]	25
ソリトンパワー [mW]	15
ソリトン長 [m]	2.5

マイケルソン干渉計によりファイバコアの slow 軸, fast 軸に直交するように 2つの直線偏光パルスを時間遅延をつけて入射させる。ファイバ光軸による遅延を補償し, 出射光が偏光干渉で直線偏光になるように微調している。このとき光路長の微調整はミラーについている PZT によって行い, 概ね 98%程度のビジビリティーを確認した。またマイケルソン干渉計は非常に外乱に弱く空気の揺らぎなどが原因で消光比が悪くなるのでPID制御により安定させている。この時エラーシグナルは, 図中の 45 度反射ミラーの微小な透過光を利用した。s 偏光と p 偏光の透過率が違うミラー (s 偏光 99%:p 偏光 99.9%) を使用し, 損失による量子効率低下を最小限にした。すなわち, パルスの所望の偏光と反射率の高いミラーの軸をあわせることによ

り損失を減らし, エラーシグナルの偏光方向は透過率の高い軸に沿うので, 信号が取得しやすくなる。

3種類のスクイズド状態の測定には Fig.3 の測定系と平衡ホモダイン検出を用いた。ホモダイン検出の際, 二つの Photo Diode (PD)の差電流を RF スペクトルアナライザで測定し, 側帯波の微弱な信号を電圧増幅器 (エヌエフ社製 SA-230F5) で増幅している。このとき繰り返しの信号と直流付近の信号によって電圧増幅器が飽和しないよう, また GAWBS ノイズのスパイクを避けるように 20 MHz の LPF (Minicircuit 社製) を挿入し, 10 MHz における位相ノイズを測定した。

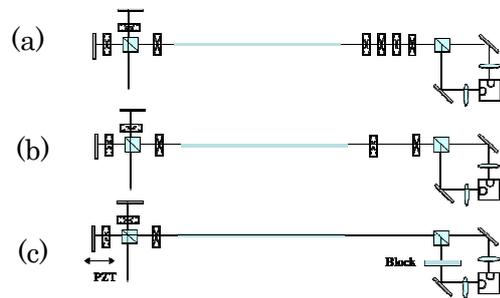
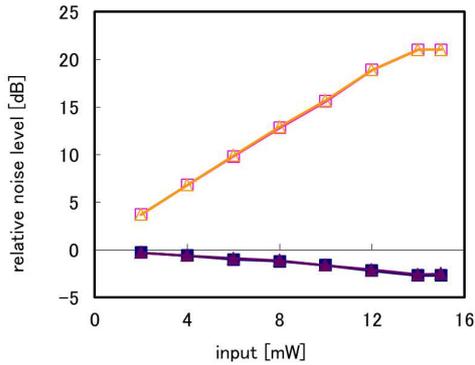


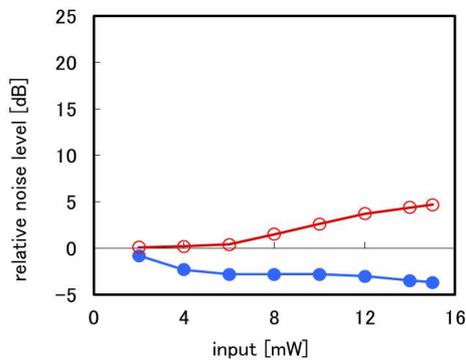
Fig.3 Measurement systems for three squeezed states: (a) squeezed vacuum; (b) polarization squeezing; and (c) photon number squeezing.

Fig.3(a)は Squeezed Vacuum(SV)の測定系である。偏光干渉において destructive な干渉をした光が SV であり, また constructive に干渉をした光を LO (local oscillator) 光として用いる。フェイズシフタにより SV と LO 光との相対位相差を調節し, 平衡ホモダイン測定する。Fig.3.(b)は偏光スクイズド光の測定系である。出射光を 1/4 波長板により円偏光にし, ホモダイン系の 1/2 波長板を回すことにより測定できる。フェイズシフタを用いないので光学系の損失は最低限にできる。Fig.3.(c)は光子数スクイズド光の測定系である。他の2つと異なり, マイケルソン干渉計の PBS で強度比が 90:10 になるように 1/2 波長板を調整する。干渉計の delay を調整しながら出射光を PD で観測する。光子数ゆらぎのみを計測するので LO 光は必要ない。

4. 実験結果および考察



(a)



(b)

Fig.5 Experimental result; 0dB line is shot noise level. (a) polarization squeezing; open triangles are anti-squeezed level and solid triangles are squeezed level. vacuum squeezing; open squares are anti-squeezed level and solid squares are squeezed level. (b) photon number squeezing, open circles are anti-squeezed level and solid circles are squeezed level.

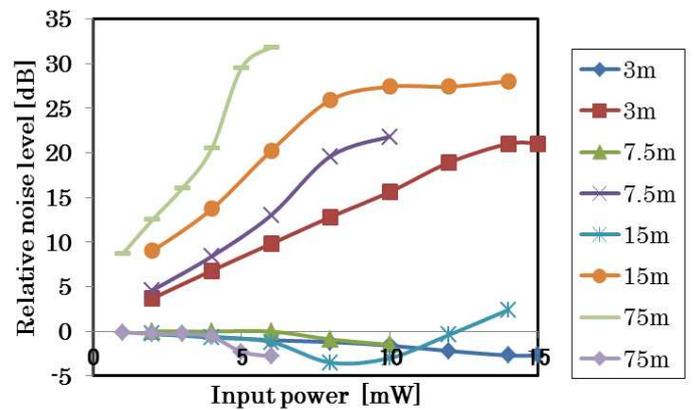
実験結果を Fig.5 に示す。横軸は slow 軸（光子数スクイージングでは強い入射強度の側）の入射強度を表しており、縦軸に量子雑音限界 Shot Noise Level (SNL) を基準としたノイズレベルを示した。Fig. 5(a) 偏光スクイージングと真空スクイージングは全く同じ実験結果となった。Fig. 5(b) に光子数スクイージングの結果を示す。SV と偏光スクイージングは入射強度が同じであれば全く同じ結果となった。

SV と偏光スクイージングは入射強度が同じであれば全く同じ結果となった。スクイージングの原理から、直線偏光で取り出すか、円偏光で取り出すかの違いしかないの

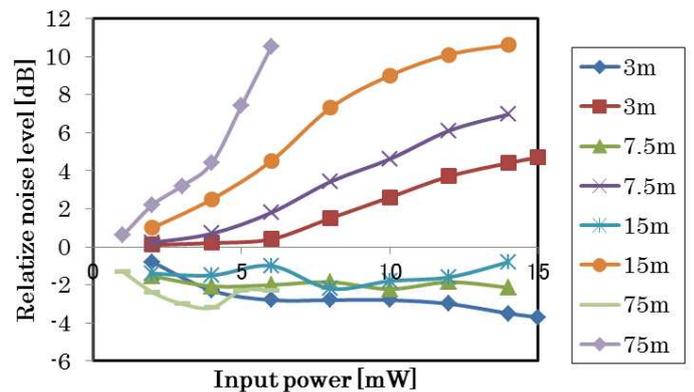
で、この結果は妥当である。むしろ、この結果から我々の SV および偏光スクイージング計測が正確であることを証明できた。

光子数スクイージングは偏光、真空スクイージングと比べて常に高いスクイージングを示した。大きな違いは、導波性ブリリュアン散乱 (GAWBS) に起因した位相のイズが、前者の2つの直交位相スクイージングには大きく影響するが、光子数スクイージングには特に低い入射強度において影響が小さい点にある。これは、GAWBS ノイズが位相ノイズであることに起因すると思われる。

Fig.6 にファイバの長さを変化させたときの実験結果を示す。



(a)



(b)

Fig.6 Experimental result; 0dB line is shot noise level; (a) polarization squeezing, and (b) photon number squeezing

偏光スクイージングの場合、ソリトンパワー15 mW 以下の入射においては、パルス幅が広がりソリトン条件を満

たしたところでソリトンとなるが、ピーク強度は低いので、非線形効果が高くパルスエネルギーに比例する GAWBS ノイズを相対的に低下できるという点では、N=1 ソリトンを入射において満たしているのがスクイーミング発生には優れているはずである。15 m での結果以外はその傾向が見られる。長さに関しては、Raman 散乱ノイズを考慮すると7ソリトン長程度が最適であるとモデル計算から予測されているが、我々の結果からは明確には最適長さを断言できない。

Fig.7に PCF を用いて SV および偏光スクイーミングを測定した結果を示す。また Table 2 使用した PCF のパラメータを示す。

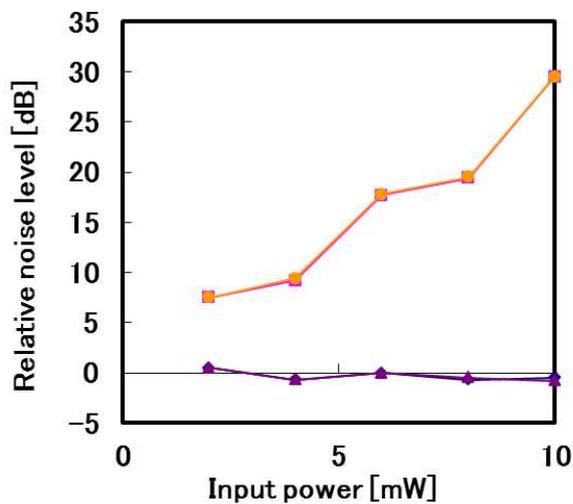


Fig.6 Experimental result; 0dB line is shot noise level. Polarization squeezing; squares are anti-squeezed level and diamonds are squeezed level. Vacuum squeezing; circles are anti-squeezed level and triangles are squeezed level.

Table.2 PCF parameters

	PM1550-01
コア系 [μm]	3.9/3.4
非線形係数 [ps^2/mm]	-75
ソリトンパワー [mW]	7.5/8.1
ソリトン長 [m]	0.93/0.86

大きな非線形効果を示すにも関わらずスクイーミングによるノイズ削減レベルは低かった。理由のひとつとしては、ファイバの長軸と短軸の非線形性が異なるために、偏

光干渉のビジビリティが低下してしまうことが考えられる。

今回の計測で得られた最大の偏光スクイーミングは、-3.4 dB であり、以下で定義される量子効率を用いてロスを換算する。

$$\eta = \eta_{\text{vis}}^2 \eta_{\text{loss}} \eta_{\text{dark}} \eta_{\text{PD}}$$

ここで各量子効率は、 $\eta_{\text{vis}} = 0.98$, $\eta_{\text{loss}} = 0.82$, $\eta_{\text{dark}} = 0.95$, $\eta_{\text{PD}} = 0.89$ である。これらを用いて測定値を補正すると、-7.1 dB に相当する。

6. まとめ

今回我々NOPI を用いて同じ条件で3種類のスクイーミングを評価することができた。その結果偏光スクイーミングと真空スクイーミングのノイズ圧搾量は等しいことが実験的に確認できた。

• References

- [1] S. Schmitt, J. Ficker, M. Wolff, F. König, A. Sizmann, and G. Leuchs, Phys. Rev. Lett. **81** 2446 (1998)
- [2] Norihiko Nishizawa, Kyosuke Sone, Junichi Higuchi, Masakazu Mori, Kazuo Yamane and Toshio Goto, Jpn. J. Appl. Phys. **41** 130 (2002)
- [3] Joel F. Corney, Joel Heersink, Ruifang Dong, Vincent Josse, Peter D. Drummond, Gerd Leuchs, and Ulrik L. Andersen, Phys. Rev. A **78** 023831 (2008)