

# 対称ファイバ干渉計を用いた正常分散領域光子数スクイズド光生成実験

Experimental demonstration of photon-number squeezed state generation in the normal dispersion regime with a symmetric fiber interferometer

保坂有杜 (M1), 廣澤賢一 (助教), 澤田亮太 (B4)

Aruto Hosaka, Kenichi Hirose, and Ryota Sawada

## Abstract

We numerically and experimentally demonstrate photon-number squeezed state generation with a symmetric fiber interferometer in an 800-nm wavelength and compared with a conventionally-used asymmetric fiber interferometer. Owing to perfect spectral phase and intensity matching between displacement and signal pulses, we obtain better squeezing of -3.1dB with symmetric fiber interferometer.

## 1. はじめに

レーザー光はポアソン分布に従う光子数の揺らぎを持っており、その分散値は光の強度に依存する。光子数スクイズド光はこの光子数の揺らぎが抑制された状態の光である。最も初めに報告された光子数スクイズド光は半導体レーザーへの注入電流を制御することで得られるというものであった。その後、超短パルスを用いた偏波保持ファイバに入射し、ファイバからの出力光に対し周波数フィルタリングを行うことで光子数スクイズド光が得られるという実験結果の報告されている。ファイバ中の四光波混合過程により、超短パルスの周波数間に正と負の量子相関が形成される。この量子相関に対し、負の量子相関のみを多く取り出すような適切な周波数フィルタリングを行うことで、光子数スクイズド状態を得ることが出来る。しかし、この手法は Opatrny らによって最適なスキームではないことが

証明されている。

一方で、光子数スクイズド光を生成するためのもう一つの手法として非対称干渉計が報告されている。初めてこの手法を用いて実験的に光子数スクイズド光が生成されたのは、Schmitt らによる非対称 Sagnac 干渉計を用いる方法である [1]。後にこれを改良した非線形偏光干渉計 [2] と非対称 Mach-Zehnder 干渉計 [3] が報告されている。ところが、これらの手法では変位のための弱い補助パルスと強度の大きい信号光との間の非線形効果の違いによるスペクトルのミスマッチを生じることとなってしまう、大きなスクイーピングレベルが得られなくなってしまう。

そこで本研究ではこの問題を解決するために、あえて強度の対称なファイバ干渉計を用い、変位の位相をマイケルソン干渉計によって変化させるといふ手法を用いて解決できることを、ファイバの正常分散領域である 800 nm 帯における実験と計算により証明することとした。

さらに、通信波長帯でのシミュレーションによって同様の比較を行い、Ref. 4 にある周波数間の量子相関から直交モードを計算する方法を用いて最適な実験スキームについて検討を行うこととする。

## 2. 実験とシミュレーション

本研究で用いた実験系を Fig. 1 に示す。光源として中心波長 808 nm、パルス幅 100 fs のモード同期 Ti:sapphire レーザーを用いている。このフェムト秒パルスをプリズム対によってあらかじめ負分散を

加えてファイバに入射した。これはファイバ中の非線形効果が入射パルスの波形によって変化するため、本実験においては、(i) Fourier transfer Limit (FTL) パルス入射、(ii) ファイバ中央で FTL 形成、(iii) ファイバ出射地点で FTL 形成、の3通りの条件で実験を行った。

分散を加えられたパルス列はPBS1によって分割され、マイケルソン干渉計によってファイバ出射地点で干渉するように遅延を加えられた上で40 cmの偏波保持ファイバのslow軸とfast軸にそれぞれ入射されている。このとき、干渉の位相はM3についているピエゾ素子に加える電圧によって調整している。PBS1の反射率 $R_1$ はHWP1によって調整し、本実験では非対称干渉計と対称干渉計の比較を行うために $R_1 = 0.9$ と $R_1 = 0.5$ の条件でそれぞれ実験を行った。

ファイバ出射後のパルスはPBS2 ( $R_2 = 0.95$ ) によって偏光干渉し、PD1によって直接光子数を計測しスペクトラムアナライザによって光子数ノイズを計測した。また、ショットノイズ雑音 (SNL) を得るためにPBS3によってホモダイン検出を行った。

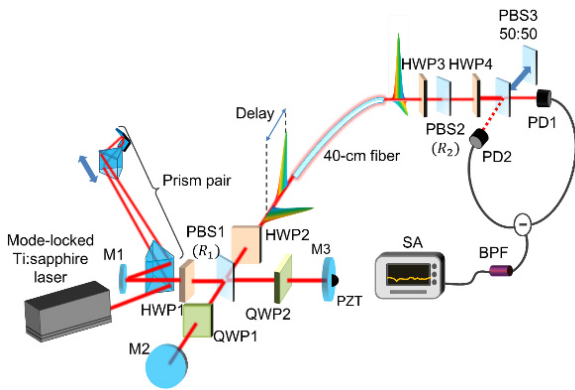


Fig. 1 Schematic view of photon-number squeezed light generation and detection. M: mirror, PBS: polarization beam splitter, HWP: half wave plate, QWP: quarter wave plate, PD: photo diode, BPF: band-pass filter, SA: spectrum analyzer, PZT: piezoelectric transducer.

### 3. 実験結果と計算結果

得られたスクイーミングレベルの実験と計算による結果を Fig. 2 に示す。zはFTLパルスを形成するファイバ中の地点を示しており、 $z = 0$  cmはFTL

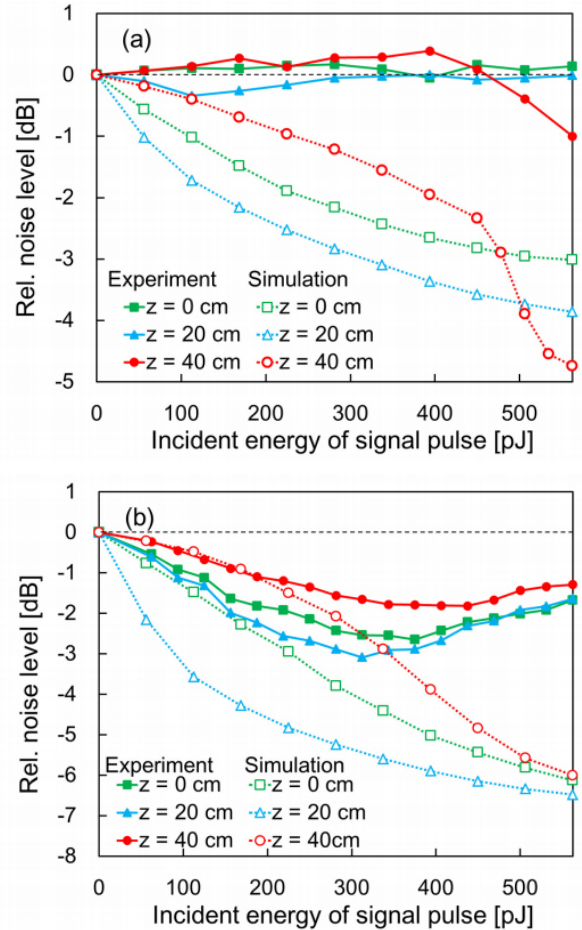


Fig. 2 Experimental (solid lines) and calculation (dashed lines) results of relative noise levels of photon-number noise compared to SNL with (a) asymmetric fiber interferometer and (b) symmetric fiber interferometer. z indicates where 562.5-pJ pulses became an FTL in the 40-cm long fiber.

入射、 $z = 20$  cmはファイバ中央で FTL 形成、 $z = 40$  cmはファイバ出射地点で FTL を形成する場合をそれぞれ示している。また、実線と点線はそれぞれ実験結果とシミュレーション結果に対応している。このグラフにおいて実験結果として得られたス

スクイーミングレベルが計算結果のそれよりも小さくなっている。これは、計算にファイバ中のノイズである Guided acoustic wave Brillouin scattering (GAWBS)と Raman 散乱を含んでいないためである。前者はファイバ内で発生する位相ノイズであり、ランダムな位相変調を受けたパルス同士が PBS2 で干渉する際に、位相ノイズが光子数ノイズに変換される。Raman 散乱は Amplified spontaneous emission (ASE)ノイズと同様、熱的なノイズと考えることができる。先行研究の異常分散領域における実験と数値解析的検討ではソリトンパワーよりも低い入射強度では GAWBS の影響が無視できないが、ソリトンパワーを超えた部分ではラマン散乱の影響が支配的であり、GAWBS の寄与は大きくないとされている。

Fig. 2(a) は非対称干渉計を用いたときの結果であり、ファイバ出射地点でFTLとなる場合に -1.0dB のスクイーミングを得た。また、Fig. 2(b)は対称干渉計を用いた場合のスクイーミングレベルであり、ファイバ中央でFTLとなる場合に312 pJの入射パワーのときに-3.1dBのスクイーミングが得られた。またFTLパルス入射、ファイバ出射地点でFTL形成の場合にもそれぞれ-2.7dBと-1.8dBのスクイーミングが得られた。対称干渉計にすることによって変位光と信号光の時間波形が一致し、干渉の際の効率が上がったことでこのようなスクイーミングレベルの上昇が得られたものだと考えられる。

#### 4. 1.55 $\mu\text{m}$ 帯における計算

ソリトンを形成し、より高い非線形効果を得られるため、ファイバの非線形効果を用いたスクイーミングの実験は通信波長帯である 1.55  $\mu\text{m}$  でより多く行われている。そのため、対称干渉計がこの波長帯においても有用であることを証明すべく、数値解析による検討を行った。

光源は中心波長 1.55  $\mu\text{m}$ 、パルス幅 125 fs、 $\text{sech}^2$

の時間波形のフェムト秒パルスレーザーを想定した。ファイバは長さ 4 m、2 次分散量  $\beta_2$  が  $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 、非線形係数  $\gamma$  が  $2.0 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  であるものとした。

非対称 Sagnac 干渉計、非対称 Mach-Zehnder (MZ) 干渉計、対称 MZ 干渉計の 3 つのスクイーミングレベルを比較した。非対称 Sagnac 干渉計と非対称 MZ 干渉計では  $R_1=R_2=0.9$  とし、対称 MZ 干渉計では  $R_1=0.5, R_2=0.988$  とした。

このときの計算結果を Fig. 3 に示す。非対称干渉計に比べ、対称干渉計の方がソリトンパワーである 250 pJ の入射パワーの付近で非対称干渉計よりも大きなスクイーミングレベルを得られることが分かった。

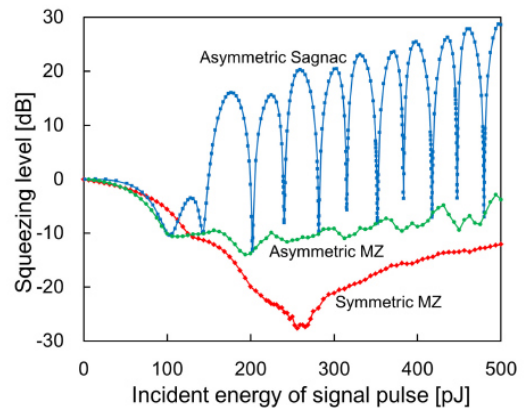


Fig. 3 Photon-number squeezing levels with three schemes: symmetric MZ (red line), asymmetric Sagnac (blue line), and MZ (green line) interferometers

また、この対称干渉計が最適なソリトンパワーにおいて最適なスキームであることを示すために、周波数間量子相関からの直交モード計算を行った[4]。

Fig. 4 が周波数間の正規化された量子相関をマッピングしたものである。これを特異値分解することで直交モードとそれに対応する分散値を得ることができる。特異値分解の結果が Fig. 5 である。Fig. 5(a) はショットノイズレベルを 0.5 としたときの各モードの分散値であり、それぞれのモード関数の形状は

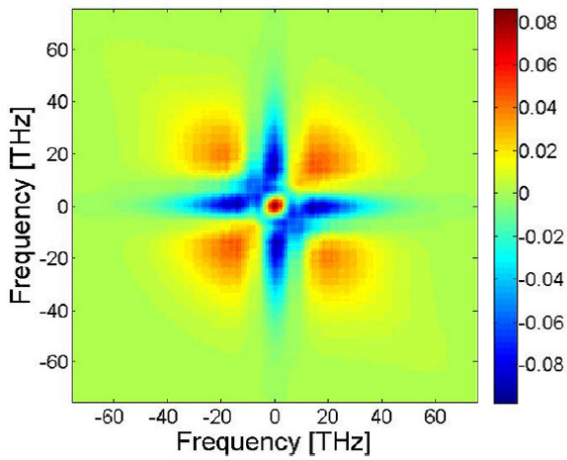


Fig. 4 Normalized quantum correlation map between frequency bins

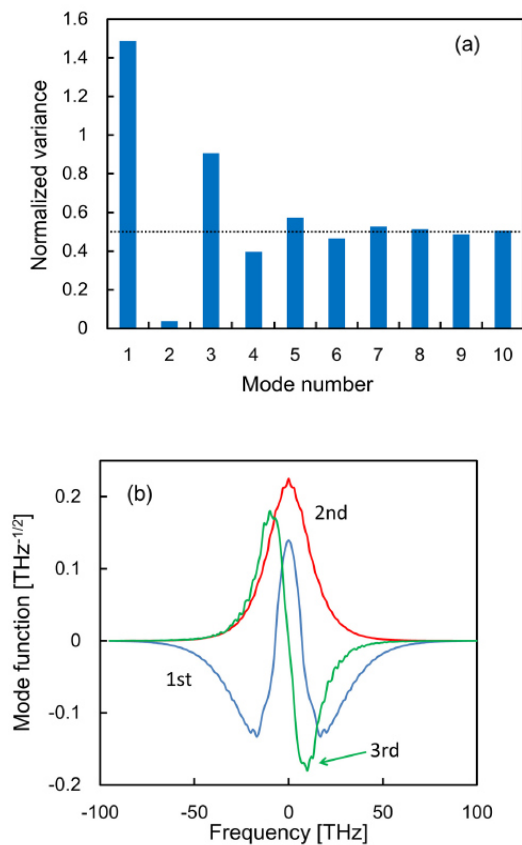


Fig. 5 Results of decomposition of quantum correlation map: (a) shows variance and dotted line indicates SNL. (b) shows first three mode functions.

Fig. 5(b) の通りである。最小分散値を取る 2 番目モードが最適なモードであるといえる。この分散値は 0.036 であり、スキューニングレベルは  $-11.2\text{dB}$  である。ここでスキューニングレベルが計算で得られた  $-25.5\text{dB}$  よりも小さくなっているのは周波数間量子相関を求めるときの周波数分解能を  $1\text{THz}$  としたため、より分解能を良くすることで  $-25.5\text{dB}$  のスキューニングレベルに近づいていくものだと考えられる。最適モードである 2 番目のモード形状と PBS2 での干渉後の波形を比較したものが Fig. 6 である。2 つの波形はほぼ一致しており、この対称干渉計が少なくともソリトン伝搬に対しては最適なスキームであることがわかる。

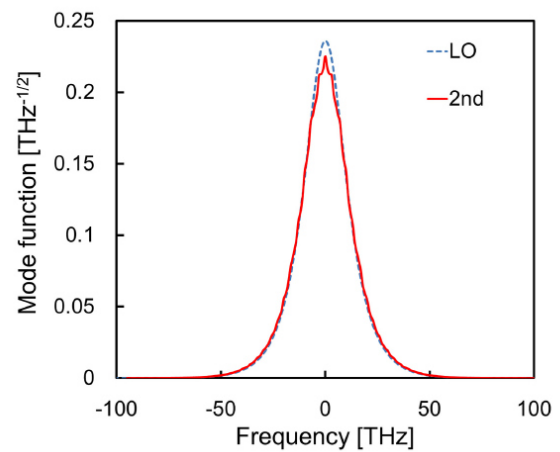


Fig.6 Mode functions of normalized LO spectrum and optimized mode function having lowest variance

## 5. 結論

正常分散領域において対称干渉計を用いたときに、計算と実験の両方で非対称干渉計に比べスキューニングレベルが向上することを示した。これは変位光と信号光の時間波形のマッチングが良くなったためである。結果として、非対称干渉計では  $-1.0\text{dB}$  のスキューニングレベルであったのに対して、対称干渉計では  $-3.1\text{dB}$  のスキューニングを得ることができた。

また、異常分散領域においても同様の計算を行い、対称干渉計の優位性を示した。さらに、周波数量子相関から最適モードを求める方法により、対称干渉計がソリトンパワーに対してほぼ最適なスキームであることを数値解析的に証明した。波形整形器などを用いることで、PBS2での干渉後の波形を最適モードと一致させることで、ソリトンパワー以外の入射強度の場合に対してもより良いスクイージングレベルが得られるものと考えられる。

## References

- [1] S. Schmitt, J. Ficker, M. Wolff, F. König, A. Sizmann, and G. Leuchs, “Photon-number squeezed solitons from an asymmetric fiber-optic sagnac interferometer,” *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2446 (1998).
- [2] J. Higuchi, N. Nishizawa, M. Mori, K. Yamane, and T. Goto, “Nonlinear polarization interferometer for photon-number squeezed light generation,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L1220 (2001).
- [3] M. Fiorentino, J. E. Sharping, P. Kumar, and A. Porzio, “Amplitude squeezing in a Mach-Zehnder fiber interferometer: Numerical analysis of experiments with microstructure fiber,” *Opt. Express* **10**, 128 (2002)
- [4] T. Opatrny, N. Korolkova, and G. Leuchs, “Mode structure and photon number correlations in squeezed quantum pulses,” *Phys. Rev. A* **66**, 053813 (2002)