

# フォトニック結晶ファイバ非線形偏光干渉計を用いた 800 nm 真空スクイズドパルス発生実験

Experimental generation of squeezed vacuum pulses at 800 nm using a photonic crystal fiber and nonlinear polarization interferometer.

澤井翔太 (B4)、佐々信介 (M2)

Shota Sawai, and Shinsuke Sassa

## Abstract

We experimentally demonstrate the generation of squeezed vacuum pulses at 810 nm using a nonlinear polarization interferometer (NOPI) with a photonic crystal fiber. A highest noise reduction of 4 dB below SNL is obtained. The output spectrum structure consisting of Stokes and anti-Stokes components as well as the main component at 800 nm varies by the slight change in the launched laser power, which makes the measurement of squeezing difficult.

## 1. はじめに

決定論的な量子テレポーテーションを可能とする連続変数における量子もつれ合い状態は二つのスクイズド光を用いて生成できる[1]。原子系との量子相関形成に適している 800nm 波長帯におけるスクイズド光をファイバ非線形光学を用いて生成する場合、光ファイバ通信帯である 1550nm 波長帯が異常分散領域であるのに対し、正常分散領域であるため非ソリトン伝搬となる。そのため伝搬と共にパルス幅の拡大とピークパワーの低下を招き、その結果ファイバ長に比例した非線形効果を得ることができない。また、光ファイバにおけるスクイズド光生成時に雑音となる導波性 Brillouin 散乱(GAWBS)はファイバ長に比例することから、40 cm の比較的短いファイバで最も高いスクイズド光が得られるという報告が中込等によりなされている[2]。現在、非線形ファイバ偏光

干渉計における直交スクイズド光発生実験において 800 nm 帯では-2.1dB[2]、1550 nm 帯では-2.46dB [3]が最大である。

一方、フォトニック結晶ファイバ(PCF)は、通常の石英ファイバに比べ高い非線形性を有する。さらにその多孔子状の構造から GAWBS を抑制したという報告もなされている[4]。

そこで本実験では、非ソリトン伝搬となる波長 800 nm 帯域において、PCF を用いた NOPI により真空スクイズド光を生成し、通常のファイバを用いた実験と比較することを目的とした。

## 2. 実験セットアップ

非線形偏光干渉計を用いたスクイズド光生成実験のセットアップを Fig. 1 に示す。光源には Ti:Sapphire レーザー(“MaiTai”, Spectra Physics 社製)を用いた。中心周波数 808 nm(780~850 nm で可変)、スペクトル半値幅 11 nm, 時間半値幅~100 fs, 繰り返し周波数 79.2 MHz である。レーザー発振器直後に配置したファラデー・アイソレータ(BB8-51, Electro-Optics Technology 社製)を通過することで付加される正の分散を補償するため、プリズム対(Schott N-SF11)を用いてパルス圧縮を行った。オートコリレータ(Scanning Autocorrelator MODEL 750, FEMTOWAVE 社製)を用いた強度自己相関計測によりファイバ入射直前のパルス幅は 84.4 fs(FWHM)となった。

実験に用いた PCF は 60 cm 長シングルモード偏波保持ファイバ(NL-PM-750, NKT Photonics

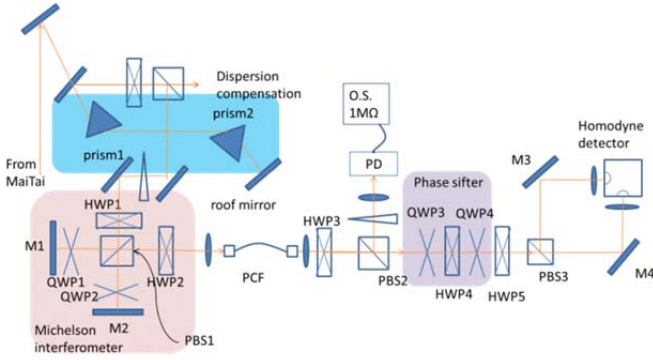


Fig. 1: Experimental setup for generation and measurement of squeezed vacuum noise. HWP: Half Wave Plate, QWP: Quarter Wave Plate, and PBS: Polarization Beam Splitter.

社製)であり、短ゼロ分散波長 750 nm, 長ゼロ分散波長 1260 nm, カットオフ波長 650 nm, モードフィールド径 1.6  $\mu\text{m}$ @780 nm, NA 0.38@780 nm, 非線形係数 $\sim 95$  (Wkm) $^{-1}$ である。ゼロ分散波長 750 nm に対し、今回用いた光源の帯域 808 nm は異常分散領域にあたり、二次の分散パラメータは $\beta_2 = -11.8$  ps $^2$ /kmである。ソリトン長は 0.31 m, ソリトンパワーは 0.37 mW である。

本実験では次節で述べるように出射パルスは 600 nm $\sim$ 950 nm の帯域に渡ってスペクトル成分を含み、ファイバ出射後の光学系の分光特性は議論の対象となるため、以下に波長板、PBS の型番を示す。用いた波長板、PBS は 1/2 波長板 (WPH05M-808, THORLAB 社製)、1/4 波長板 (WPQ05M-808, THORLAB 社製)、広帯域偏光ビームスプリッター (PBSW-10-800, SIGMA KOKI 社製)である。また、マイケルソン干渉計に用いたミラー M1, M2 が 800 nm 用誘電体ミラーであるのに対して、M3, M4 は 600 nm 帯の損失を考え、金ミラーを用いた。

### 3. 実験結果

visibility の結合パワー依存性を測定した結果を Fig. 2 に示す。結合パワー 0.5 mW を 6.0 mW に増加させると visibility は 97% から 50% まで低下した。通常の石英ファイバではこのような現象は

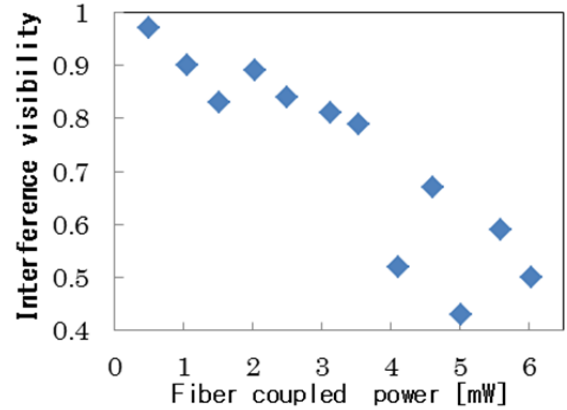


Fig. 2: Dependence of measured interference visibility on coupling laser power.

見られず、結合パワー 10 mW $\sim$ 50 mW に渡り 95% 以上の visibility が観測される。そこで、ファイバ出射パルスのスペクトルを調査した。その結果を Fig. 3 に示す。結合パワーが増加すると、入射パルスの波長 808 nm より長波長側の 840 nm 付近に Stokes Raman 成分が現れ (1.52 mW), さらにパワーを上げていくと 600 $\sim$ 650 nm に anti-Stokes Raman 成分が現れている (2.5 mW 以上)。また、2 つの伝搬軸によるスペクトルの違いは結合パワーの増加とともに大きくなる。その結果、2 つのパルスは上手く偏光干渉しない。これが visibility 低下の原因であると考えられる。

visibility を測定した結合パワーに対する、真空スクイズドパルスのスクイズング量の測定を行った。SNL を基準とした雑音量を Fig. 4 に、対応する SNL を Fig. 5 に示す。結合パワー 3.04 mW において最大で -4.0 dB の雑音減少を観測した。これを以下に定義される式により、SV が被る損失を考慮しスクイズングレベルを校正する。

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

ここで各効率 $\eta_{\text{dark}} = 0.97, \eta_{\text{loss}} = 0.93, \eta_{\text{vis}} = 0.81, \eta_{\text{PD}} = 0.81$ である。これらを用いて測定値を補正すると、-7.2 dB に相当する。

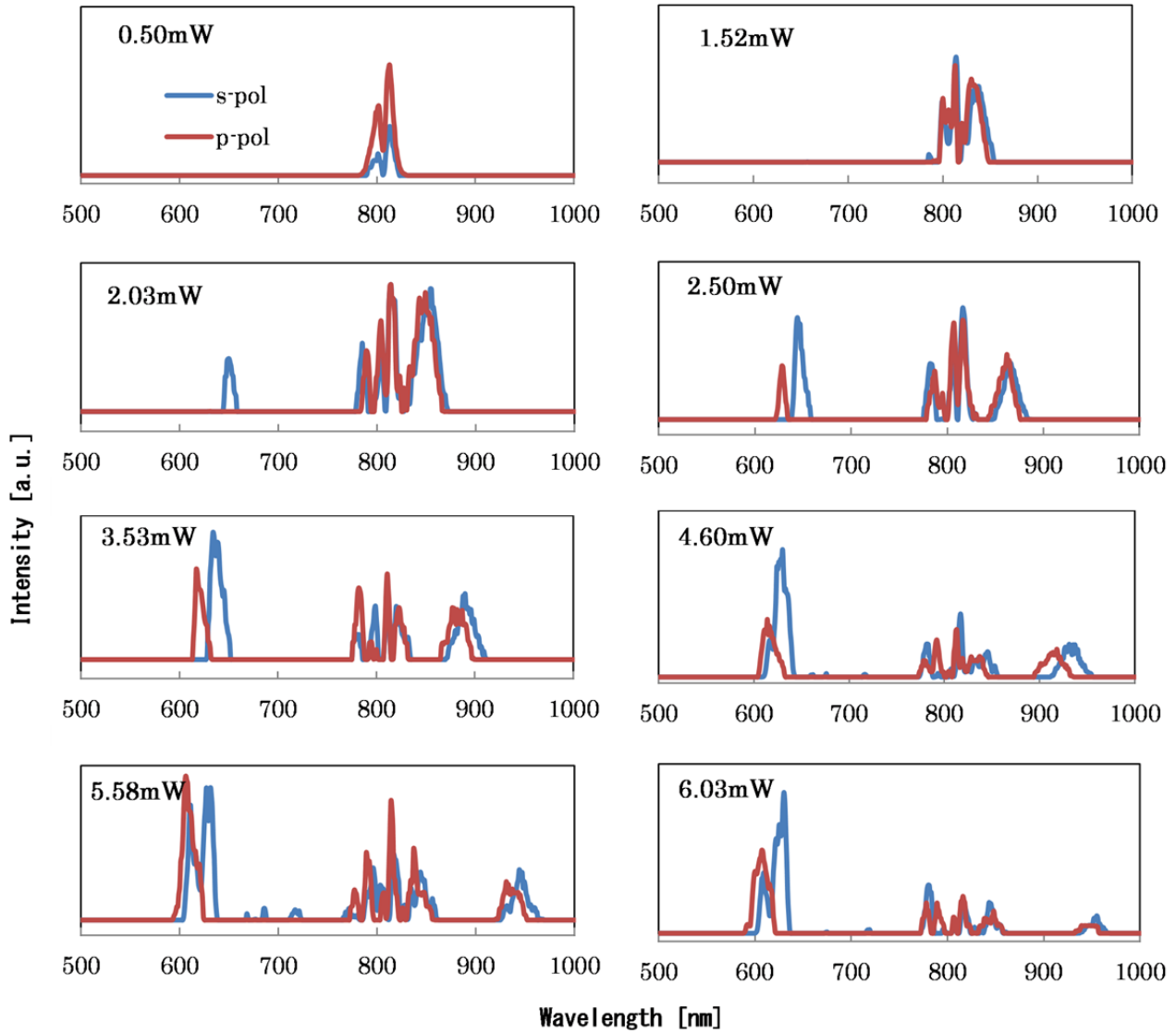


Fig. 3: Spectrum of output light: Blue line shows spectrum of s-polarization. Red line shows spectrum of p-polarization.

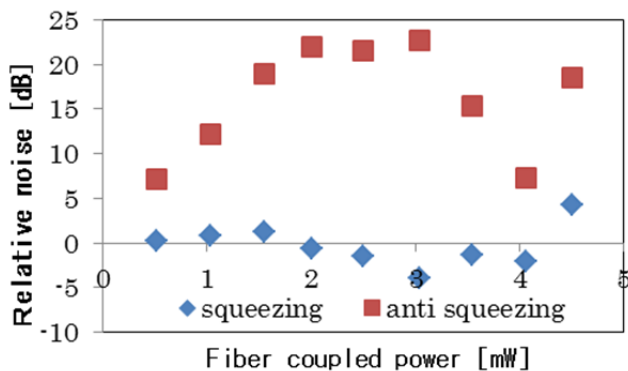


Fig. 4: Dependence of relative magnitude of squeezing on coupling power. Red and blue plots show anti-squeezing and squeezing, respectively.

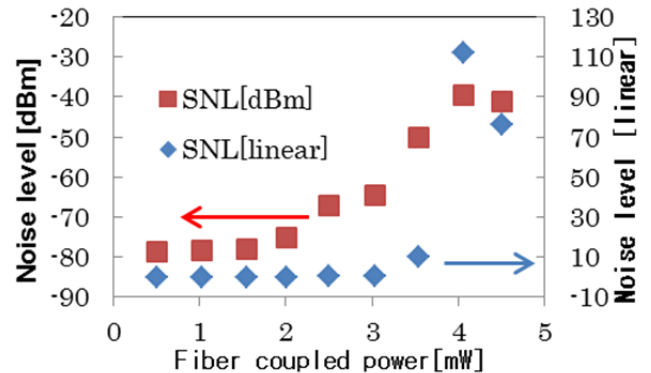


Fig. 5: Dependence of SNL magnitude on coupling power. Red and blue plots show SNL magnitude in logarithmic scale and in linear scale, respectively.

### <PCF-NOPI 問題点>

実験において、(i) 結合パワーが増加すると SNL の変動が起こる(ii) 結合パワーに対して SNL の線形が確認できないことが問題となった。以下にそれぞれについて説明する。

(i) 結合パワーが増加すると SNL の変動が起こる。

Fig. 6 に 0.51 mW, 4.51 mW における SNL と SV 雑音の測定結果を示す。4.51 mW では掃引時間 5 秒中に SNL が揺らいでいるのが確認できる。この原因は次のように考えられる。干渉計の揺れあるいはコアの揺れが結合パワーの揺れにつながり、パルスが受ける非線形、すなわちスペクトル広がり揺れを引き起こす。このスペクトル変動の起きる帯域では、波長板、偏光ビームスプリッター、PD の周波数特性が変動している領域であり、ホモダイン検出器のバランスに影響を与えている。

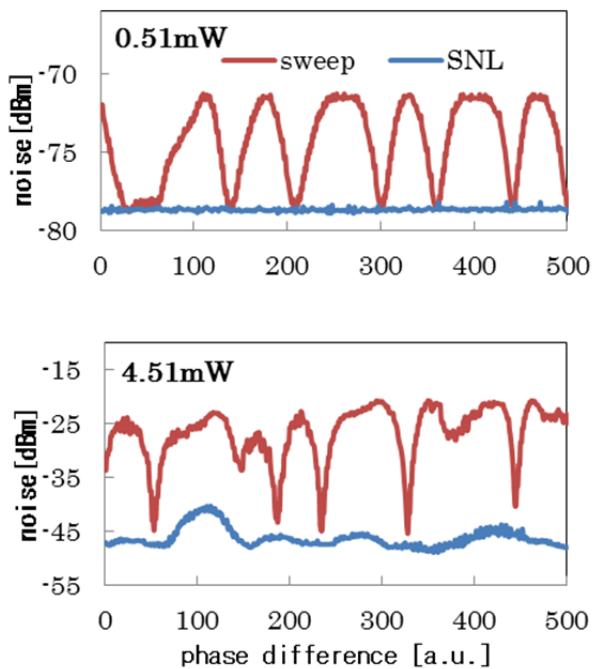


Fig. 6: Dependence of magnitude of noise level on relative phase between LO and SV.

(II) 結合パワーに対して SNL の線形が確認できない。

原理的には SNL は結合パワーに比例し、一対一

の関係がある。しかし、結合パワーの増加に伴う visibility の悪化により LO 光損失から考えれば、低パワーで保たれていた線形性がパワーの増加に伴い頭打ちされたような結果を得るのであれば不思議ではない。ところが、結合パワーが増加すると低パワーで保たれる線形性に対して高い値に外れる。これは、波長板、偏光ビームスプリッター、ミラーの反射率やホモダイン検出器に用いた PD の分光感度特性が 600 nm~1000 nm にわたってフラットでないことが原因であると考えられる。

### 4. まとめ

フォトニッククリスタルファイバ NL-PM-750 を用いて非線形偏光干渉計 NOPI を構築し、真空スクイズドパルスの生成および確認を行った。

- Visibility は 0.5 mW から 6.0 mW にかけて 97% から 50% まで低下した。これは通常の石英ファイバでは見られない現象である。

- ファイバから出射されたパルスのスペクトルには、入射パルスの帯域 800 nm より長波長側の成分(ストークス成分)、および短波長側の成分(アンチストークス成分)が観測された。結合パワーの増加に伴い、ファイバ伝搬軸の違いによるスペクトルの差は大きくなり、これが visibility 低下の原因であると考えられる。

- スクイズング測定の結果、結合パワー 3.04 mW において SNL 以下 -4.0 dB(量子効率を考慮すると -7.2dB)の雑音減少を観測した。ただし、結合パワー 2 mW 以上では、安定した SNL 計測ができず、結合パワーに対する線形性が確認できない。

- SNL 計測に関して以下の問題点がある。

- ✓ SNL が安定して計測できない(sweep 中に変動する)。
- ✓ SNL の結合パワーに対する線形性がとれない。

- SNL 計測に関する問題に対する対策

- ✓ ファイバ出射後の光学系をより広帯域なものにする。特に偏光ビームスプリッターをより

広帯域にできれば大きな改善が見込まれる。

- ✓ 800 nm 帯以外の成分をカットする。ストークス成分、反ストークス成分がスクイズド状態にとって雑音となるか損失となるか興味深い。
- ✓ 入射パルス幅を大きくしてラマン散乱を抑える。パルス幅を大きくしても十分なスクイジングが得られる可能性があり、ラマン散乱が抑えられれば現在の光学系で正確な測定ができるはずである。また、本実験において結合パワー2 mW 以下の低パワーでは、スクイジングが確認できなかった。ただし、これは得られる非線形効果が小さいためではなく、電気ノイズと SNL の差が非常に小さいことが原因ではないかと筆者は考えている。そのため、得られる非線形効果が同じでも結合パワーを増加させればスクイジングが観測される可能性があると考ええる。
- ✓ コアの大きいファイバを用いて結合パワーの揺れを抑える。この方法も高非線形性とトレードオフである。

## References

- [1] A. Furusawa, J. L. Sørensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble, and E. S. Polzik, *Science* 282, 706 (1998).
- [2] H. Nakagome, H. Ushio, Y. Itoh, and F. Kannari, *Opt. Express* 19, 1051 (2011).
- [3] J. Higuchi, N. Nishizawa, M. Mori, R. Goto, D. Maruhashi, and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, L160 (2004).
- [4] D. Elser, U. L. Andersen, A. Korn, O. Glöckl, S. Lorenz, Ch. Marquardt, and G. Leuchs, *Phys. Rev. Lett.* 97, 133901 (2006).