

非線形偏光干渉計を用いた 800nm 帯における エンタングルメントパルス対生成実験

Generation of entangled pulses at 800 nm using fiber nonlinear optics

佐々信介(M2) 澤井翔太(B4)

S. Sassa and S. Sawai

• Abstract

Entangled pulse pair is generated by mixing two squeezed states using a beam splitter. In this study, a scheme to generate entangled pulses using squeezed vacuum pulses (-2.4dB) generated by an optical nonlinear fiber polarization interferometer with 800-nm femtosecond laser pulses and the detection method are studied.

1 はじめに

コヒーレント光源を利用した連続変数に基づく量子光学は、単一光子光源を用いた離散変数量子光学とともに量子情報処理のための基盤技術を構築する重要な役割を果たしている。とくに決定論的な量子テレポーテーションは、二つの真空スクイズド光からなる量子もつれあい状態によってのみ実現されている。[1]

そこで本研究の目的は、非線形ファイバ偏光干渉計を用い、波長 800nm 帯における量子もつれ光パルス対生成を発生させる手法について研究することである。直交位相振幅や偏光等の連続変数に基づき量子もつれあい状態は2つのスクイズド状態をビームスプリッタで合波することにより生成することができることは知られている。本研究では、スクイズド真空場と局所発振光の空間的モード整合をほぼ 100%にできる非線形ファイバ偏光干渉計を二台用意しビームスプリッタ(BS)で合波することで量子もつれ光パルス対を発生させる光学系を構築した。量子もつれ状態の確認にはさまざまな方法があるが、我々は偏光スクイージン

グ状態に基づいた量子もつれ生成と計測の手法を試みた。2つのスクイザーからのパルスを干渉させる際の干渉計の揺らぎ、LO 光の相対位相走査の手法について調べた。

2 理論[2]

二つの量子状態が以下のような状態の直積であらわされないとき、二つの状態はエンタングルしていると定義される

$$\hat{\rho} \neq \sum_i p_i \hat{\rho}_{ia} \otimes \hat{\rho}_{ib} \quad (1)$$

2 モードスクイージング状態に対応するエンタングルメント状態は、次式のように $\hat{x}_a - \hat{x}_b$ と $\hat{p}_a + \hat{p}_b$ の同時固有状態であることが知られている。

$$\Delta(\hat{x}_a - \hat{x}_b)\Delta(\hat{p}_a + \hat{p}_b) = 0 \quad (2)$$

x と p を同時に決めることはできないが $\hat{x}_a - \hat{x}_b$ と $\hat{p}_a + \hat{p}_b$ なら同時に決定できる。

BS における重ね合わせ前後の状態を直行位相振幅 X, Y をもちいて Fig.1 及び式(3)~(6)のように表す。

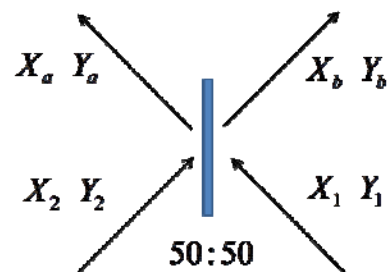


Fig 1 input and output state on beam splitter

$$X_1 = \sqrt{\eta_1} [\exp(-r_1) X_1^{(in)}] + \sqrt{1-\eta_1} X_1^{(v)} \quad (3)$$

$$Y_1 = \sqrt{\eta_1} [\exp(r_1) Y_1^{(in)}] + \sqrt{1-\eta_1} Y_1^{(v)} \quad (4)$$

$$X_2 = \sqrt{\eta_2} [\exp(-r_2) X_2^{(in)}] + \sqrt{1-\eta_2} X_2^{(v)} \quad (5)$$

$$Y_2 = \sqrt{\eta_2} [\exp(r_2) Y_2^{(in)}] + \sqrt{1-\eta_2} Y_2^{(v)} \quad (6)$$

ただし、右肩の添え字(in),(v)はそれぞれ入力真空場、損失による真空場を表しており、最少不確定関係、 $\langle \Delta^2 X_i^{(in)} \rangle = \langle \Delta^2 Y_i^{(in)} \rangle = \langle \Delta^2 X_i^{(v)} \rangle = \langle \Delta^2 Y_i^{(v)} \rangle = 1/2$ を満たす。BS の入出力の直交位相振幅をこの様に定義した時、BS の入出力関係は真空スクイズド光間の位相差 θ を用いて以下のような行列の積で表す事できる。

$$\begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ X_b \\ Y_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & 0 & -r \cos \theta & r \sin \theta \\ 0 & t & -r \sin \theta & -r \cos \theta \\ t & 0 & t \cos \theta & -t \sin \theta \\ 0 & t & t \sin \theta & t \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

r, t はそれぞれ BS における反射率、透過率であり、 $r^2 + t^2 = 1$ を満たす。式(7)から直行位相振幅対の分散は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \langle \Delta^2 (X_a + X_b) \rangle \\ = (t+r)^2 \langle \Delta^2 X_1 \rangle + (t-r)^2 (\langle \Delta^2 X_2 \rangle \cos^2 \theta + \langle \Delta^2 Y_2 \rangle \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \langle \Delta^2 (Y_a - Y_b) \rangle \\ = (t-r)^2 \langle \Delta^2 Y_1 \rangle + (t+r)^2 (\langle \Delta^2 X_2 \rangle \sin^2 \theta + \langle \Delta^2 Y_2 \rangle \cos^2 \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

特に $r=t=1/\sqrt{2}$ 、 $\theta=\pi/2$ のとき、式(8),(9)は、

$$\langle \Delta^2 (X_a + X_b) \rangle = 2 \langle \Delta^2 X_1 \rangle \quad (10)$$

$$\langle \Delta^2 (Y_a - Y_b) \rangle = 2 \langle \Delta^2 X_2 \rangle \quad (11)$$

と表される。 X は不確定性関係を満たす二つの物理量 X, Y のうち揺らぎが圧搾された方の物理量であり、有限のスクイズングが得られていれば ($r_i > 0$)、

$\langle \Delta^2 X_1 \rangle < 1/2, \langle \Delta^2 X_2 \rangle < 1/2$ となり、不等式

$$\langle \Delta^2 (X_a + X_b) \rangle + \langle \Delta^2 (Y_a - Y_b) \rangle \geq 2 \quad (12)$$

を破り、エンタングルメント状態であると評価される。

3 スクイズドパルス測定実験

Fig.2 に実験セットアップを示す。

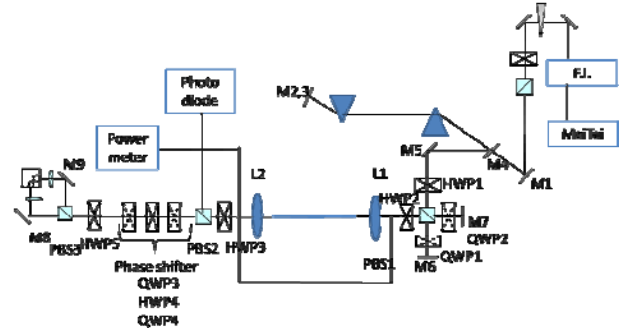


Fig.2 Experimental setup. PBS: polarization beam splitter, HWP: half wave plate, QWP: quarter wave plate M: mirror, F.I.: Faraday Isolator

光源はカーレンズモード同期 Ti:sapphire フェムト秒パルスレーザ”MaiTai”(Spectra Physics)である。パルスの中心波長は 750 ~ 850 nm まで設定可能であり実験は中心波長 808 nm で行った。ポンプ光の強度は 4.5 W 出力強度は 0.5 W スペクトル幅 11 nm, 時間幅 100 fs。繰り返し周波数 79.2 MHz である。

光源からの光はファイバからの端面反射によってモード同期が外れることを防ぐためにファラデーアイソレーター(F.I.; Faraday Isolator)を挿入した。またファイバによる非線形効果をより享受するためにプリズム対を用いてパルスの分散補償を行っている。分散補償後のパルス時間幅は SHG 強度自己相関計測により sech^2 関数近似で 80 fs と測定された。分散補償されたパルスはマイケルソン干渉計により二つのパルスに分離しそれぞれ fast 軸と slow 軸に導く。マイケルソン干渉計の腕

の長さにより各々のパルス間の時間遅延を調整する。ファイバ中で三次非線形効果を受けた二つのパルスはファイバ射出口で干渉し SV 光と LO 光を同時に生成する。干渉により生じた SV パルスと LO パルスを用いてホモダイン測定系により SV の信号雑音を観測する実験となる。この時 QWP3,4 および HWP5 によって構成されるフェイズシフタにより SVLO 間の相対位相を調整した。

また PBS2 は干渉明度の想定及び SNL 測定時に使用する。SNL 測定では信号光である SV を取り除いた光の雑音量 (LO パルスの雑音量) を測定することにより求めている。

使用したファイバは PM-780 コア径 $5.3 \mu\text{m}$ 長さ 40cm である。

実験結果を Fig.3 に示す。

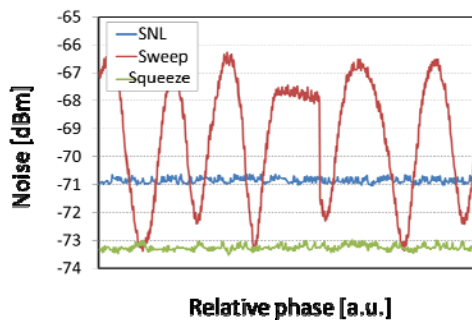


Fig.3 Experimental results, blue line; shot noise level, green line; squeezed noise level, red line; squeezing and anti-squeezing noise level.

SV : LO 比は 1:200, またアドバンテスト社製電気スペクトラムアナライザを用いて 21MHz の量子雑音を RBW 100 kHz , VBW 10 Hz で測定した。入射パワーがファイバの片軸 12 mW ずつの時に最大 -2.4dB のスクイジングによるノイズ削減を確認することができた。

4 エンタングル確認実験

実験セットアップを Fig.4 に示す。

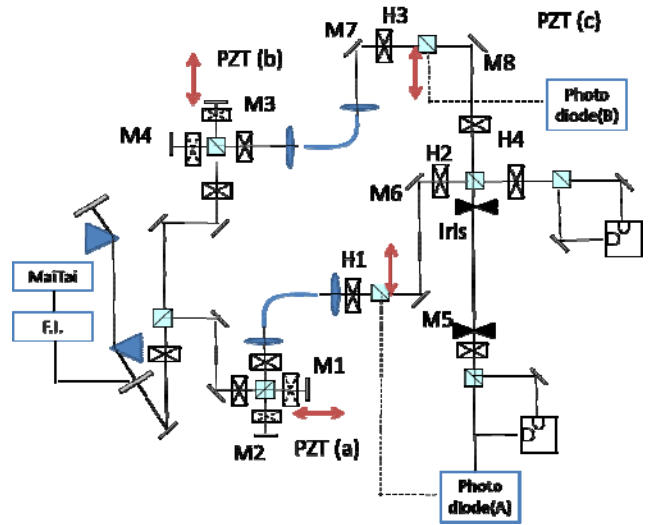


Fig.4 Experimental setup to confirm entangled state. H: half wave plate, M: mirror, F.I.: Faraday Isolator PZT: piezo actuator

二台の NOPI を用いて生成された SV パルスを時間的および空間的に PBS で重ね合わせる。パルス間の相対位相 θ の調整は M8 ミラーマウントに付属させた PZT 素子を用いて行った。PZT 素子にファンクションジェネレーターを用いて 1Hz の電気信号を印加し空間的な距離の調整で位相を変化させることで $\theta=0$, 及び $\pi/2$ 重ね合わせ状態の量子雑音を測定できる。重ね合わせの空間モードマッチは 90% で測定を行った。またエンタングル状態である SV パルスの重ね合わせ後信号光は重ね合わせ位相 θ により円偏光及び直線偏光に変化する。 $\theta=\pi/2$ である信号光が円偏光の状態の量子雑音を測定するため偏光スクイジングの測定系を組んだ。[4]

重ね合わせ後の光をホモダイン計測した実験結果を Fig.5 に示す。

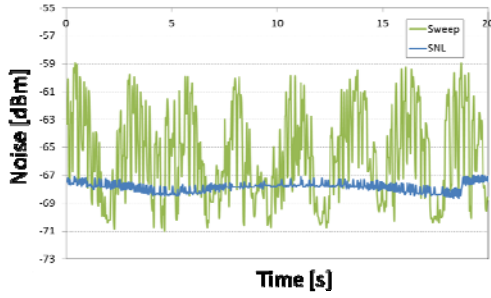


Fig.5 Measured noise level of superposed SV pulses.

SNLはPBS重ね合わせ前に信号光を除去することで求めた。測定雑音は次式のように表される。

$$P_N(\varphi) = \cos^2 \varphi \langle \Delta^2 X_a \rangle + \sin^2 \varphi \langle \Delta^2 Y_a \rangle \quad (13)$$

ここで、 φ はLOと信号間の位相差である。特に $\varphi=0$ のとき、

$$\begin{aligned} P_N(0) &= \langle \Delta^2 X_a \rangle \\ &= \frac{1}{2} (\langle \Delta^2 X_1 \rangle + \cos^2 \theta \langle \Delta^2 X_2 \rangle + \sin^2 \theta \langle \Delta^2 Y_2 \rangle) \end{aligned} \quad (14)$$

$\varphi=\pi/2$ のとき、

$$\begin{aligned} P_N(\pi/2) &= \langle \Delta^2 Y_a \rangle \\ &= \frac{1}{2} (\langle \Delta^2 Y_1 \rangle + \sin^2 \theta \langle \Delta^2 X_2 \rangle + \cos^2 \theta \langle \Delta^2 Y_2 \rangle) \end{aligned} \quad (15)$$

と書ける。 $\theta=\pi/2$ のとき式(14)は最大となり、式(15)は最小となる。二つの真空スクイズド光のスクイジングパラメータが等しいとき($r_1=r_2$)、 $P_N(0)=P_N(\pi/2)$ となり φ に依存しない値となる。Fig.5を見れば、LOと信号の位相差 φ が分かり(雑音が最小となるとき $\varphi=0$ 、雑音が最大となるとき $\varphi=\pi/2$)、エンタングルメント確認実験において必要な φ の調整ができる。

次に二台のホモダイン信号の差信号及び和信号を測定した。Fig.6に測定結果を示す。

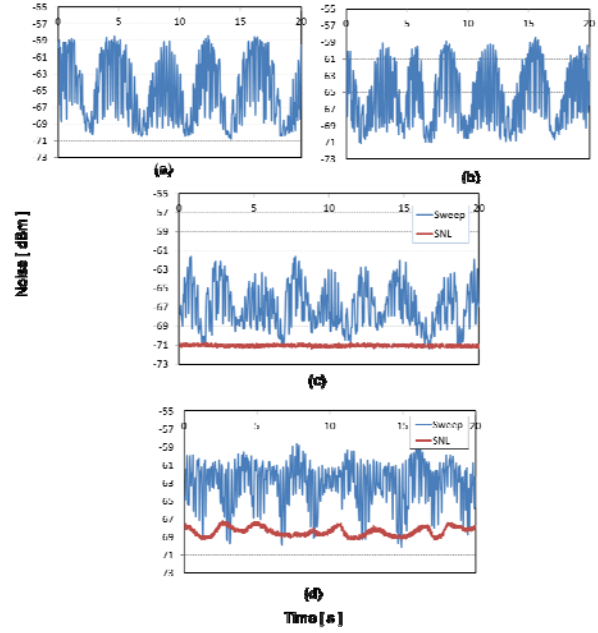


Fig.6 Experimental result : (a)and(b)input state of two NOPIs; (c) sum signal; and (d) difference signal.

(a)(b)は入力状態の測定である。(c)では一台のホモダインの測定をスクイジングに設定し二台目の和信号を観測しながら測定を行った。(d)も同様である。また差信号と和信号の切り替えはR&K社製ハイブリッドジャンクションを用いて行った。

差信号及び和信号のノイズ量をSNL付近にまで落とすことはできたがそれ以上のノイズ削減は確認できないため、量子もつれ状態の確認までには至っていない。

5 結論

- ・超短パルスによって顕著に引き起こされるオプティカルファイバーの三次非線形光学効果を用いてスクイズド真空場発生実験を行い最大-2.4dBのスクイジングを得ることができた。
- ・量子もつれ状態の確認方法と実験的な達成方法がわかった。今回の測定条件ではSNL以下にノイズを抑えることができないということがわかった。今後は空間モードマッチの向上や測定方法の改案

などが必要になる。

• References

- [1] A. Furusawa, et al.: Science **282**, 706 (1998)
- [2] Yun Zhang, Tatsuya Furuta, Ryuhi Okubo, Kosuke Takahashi, and Takuya Hirano Yun Zhang, Tatsuya Furuta, Ryuhi Okubo, Kosuke Takahashi, and Takuya Hirano: Phys. Rev. A **76**, 012314 (2007)
- [3] 衛藤雄二郎: 通信波長帯パルス光の連続変数エンタングルメントに関する研究 学習院大学博士論文 (2008)
- [4] 伊東泰幸: 光ファイバにより発生させた 1550nm 帯域での真空スクイズド光と偏光スクイズド光の比較 慶應義塾大学修士論文 (2010)