

通信波長帯におけるシングルパスパラメトリック下方変換 によるスクイズドパルス発生

Homodyne detection of 1.57- μm squeezed vacuum pulse with
degenerate optical parametric oscillator pumped by a common 785-nm laser

大見 聡仁(B4), 保坂 有杜(D2), 富田 雅也(M1), 新村 星太郎(B4)
Akihito Omi, Aruto Hosaka, Masaya Tomita, Shintaro Niimura

Abstract

We generate 1.57- μm squeezed vacuum pulses by degenerate spontaneous parametric down conversion (DSPDC) and observe 3.5dB anti-squeezing and -0.48dB squeezing using local oscillator pulses generated from a degenerate synchronously pumped optical parametric oscillator.

1. はじめに

スクイズド状態とは直交位相振幅の一方が圧搾されたものであり,この状態をビームスプリッタなどで混ぜ合わせてあげると出力は量子もつれ合い状態を示すことが知られている.量子もつれ合い状態とは2つの入力光子をA, Bとしてそれぞれの状態を $|\psi_A\rangle_A, |\psi_B\rangle_B$ とした時に,出力状態は $|\psi\rangle_{AB} \neq |\psi_A\rangle_A \otimes |\psi_B\rangle_B$ と2つの系の直積で表されない,つまり全体の状態が部分系の状態に分離でないような状態のこと

をいう.このようなもつれ合いという性質から,スクイズド光は連続量の量子情報処理において必要不可欠な光源となっている[1].例えばquantum teleportation[2], dense coding[1], quantum computing[3]などの量子演算で利用されている.またスクイズド光の低ノイズ性から,量子限界を超えた超高感度測定にも利用されている.

スクイズド光はパラメトリック下方変換 (Spontaneous parametric down conversion: SPDC) において光子ペアとして生成されることが知られている.SPDCにより生成されたスクイズド光は,これとコヒーレントな関係にある強度の強い光(Local oscillator: LO) と干渉させることで測定することができる(バランス型ホモダイン測定).

従来の手法では, Fig.1のように,まず入力レーザーの基本波(ω)を第二高調波発生(SHG)させた二倍波

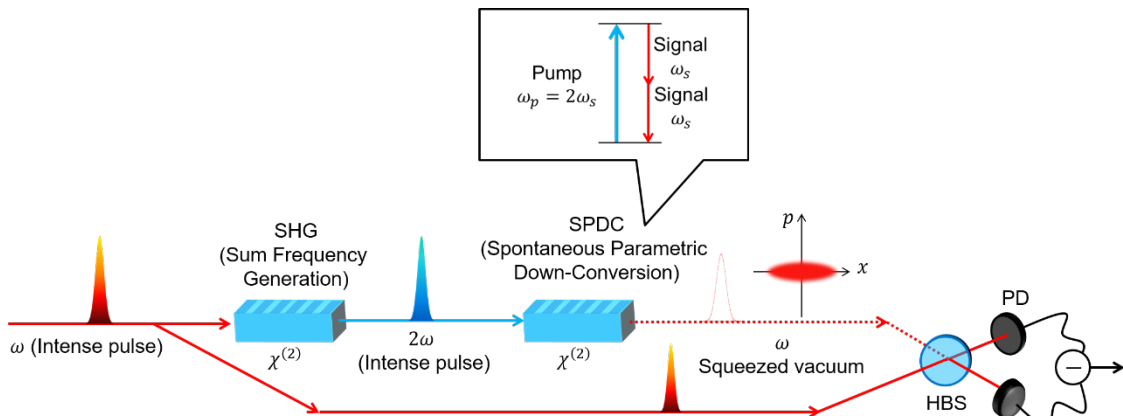


Figure 1. Conventional scheme for generating and measuring squeezed pulses

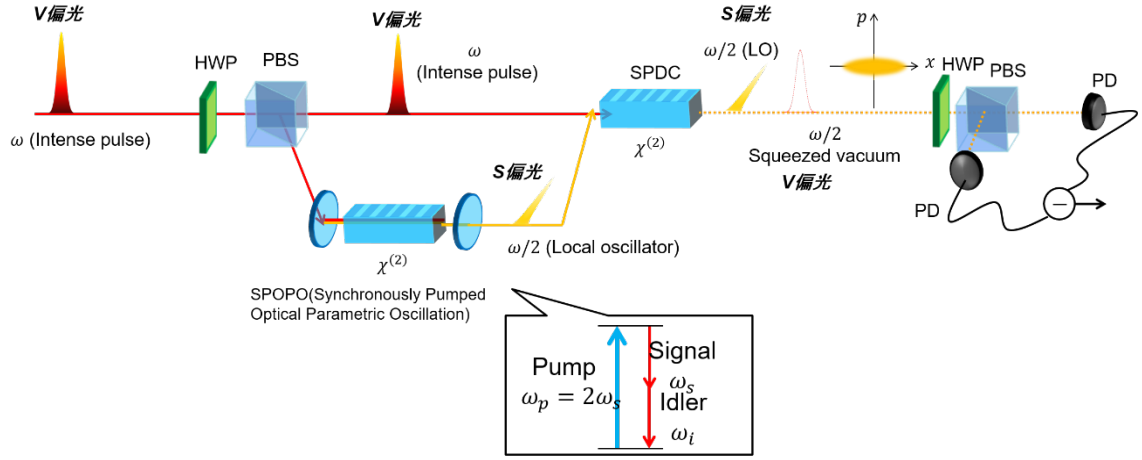


Figure 2. New scheme for generating and measuring squeezed pulses with SPOPO

(2ω) を SPDC させることでスクイズド光(ω) を生成する.これをスクイズド光とコヒーレントな基本波でバランス・ホモダイン測定している[4, 5].しかし,この手法では,得られるスクイズド光の波長帯は,LO 光の波長帯,使用するレーザの波長帯に制限されてしまい,拡張度が小さいという問題がある.

本研究ではFig.2のように,基本波を直接SPDC させて得たスクイズド光($\omega = 1/2$)を,縮退発振した Synchronously pumped optical parametric oscillator(SPOPO)によりLO 光($\omega = 1/2$)を生成し,バランス型ホモダイン測定を試みる.ただしSPOPOは縮退発振のとき,signal光($\omega/2$)の二倍波はpump光(ω)とコヒーレントであることが知られている[6].この手法により入力レーザの波長帯の2 倍の波長帯を持つスクイズド光の生成・測定という,自由度の高いスキームを提案していく.

2. 縮退SPOPOの原理

SPOPOは,パルス励起光源をpump 光として使う共振器で,入射pump パルスとOPO 内のパルスの位相が常に揃うように共振器長が調整された共振器である.SPOPOでは,

$$2\phi_{x,i} - \phi_p = m2\pi + \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

の関係性を満たす SPDC が起こり,signal 光と idler 光が生成される.(共振器中で増幅されコヒーレント光となる).signal 光と idler 光が非縮退状態の時,それぞれの周波数は,

$$f_{\text{signal}} = nf_{\text{rep}} + f_{s,CEO} \quad (2)$$

$$f_{\text{idler}} = nf_{\text{rep}} + f_{i,CEO} \quad (3)$$

$$f_{\text{pump}} = (n + m)f_{\text{rep}} + f_{s,CEO} + f_{i,CEO} \quad (4)$$

となる.この時,pump の 1/2 倍波と signal, idler の位相は CEO が等しくないために,位相は揃わない.一方で,signal 光と idler 光が縮退状態の時,それぞれの周波数は,

$$f_{\text{pump}} = 2nf_{\text{rep}} + 2f_{s,CEO} \quad (5)$$

$$f_{\text{signal}} = f_{\text{idler}} = nf_{\text{rep}} + f_{s,CEO} \quad (6)$$

となり, $1/2 f_{\text{pump}} = f_{\text{signal}}$ となる.SPOPO が縮退発振する時,pump の 1/2 倍波と signal の CEO が等しくなり,位相が揃う.

3. SPOPO による 1.57- μm LO 光の生成

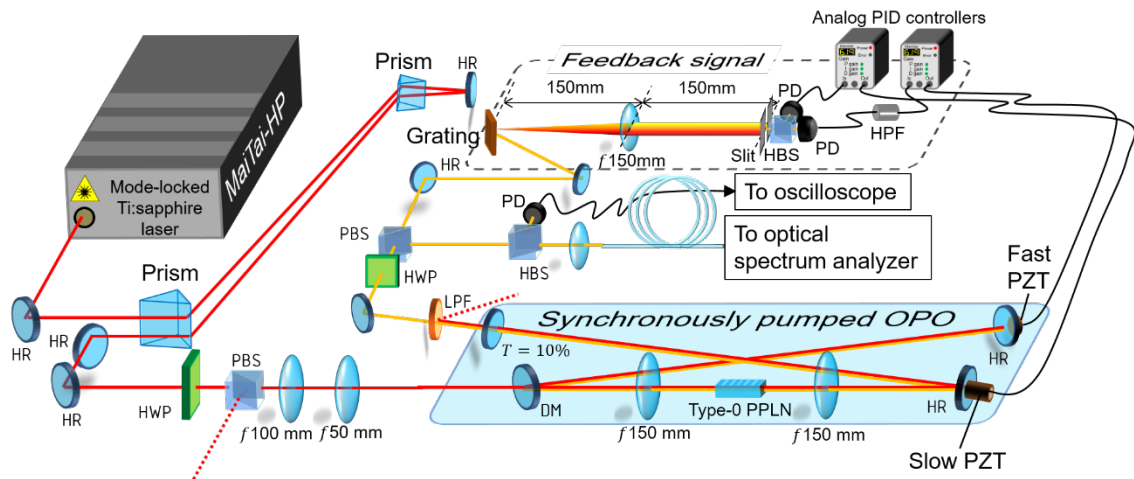


Figure 3. The experimental setup for LO pulse generation: SPOPO. Input laser pulse: 785-nm mode-locked Ti:sapphire laser. HWP; half wave plate, PBS; Polarization beam splitter, DM; dichroic mirror, HBS; half beam splitter, LPF; long pass filter, HPF: high pass filter, PD; InGaAs photo diode, PZT; piezoelectric actuator.

縮退 SPOPO により,785-nm pump 光から 1.57- μm LO 光を生成していく.Fig.3 のように,pump 光を,一体型モードロック Ti:Sapphire レーザ(MaiTai)より,パルス幅 90 fs,繰り返し周波数 80 MHz,中心波長 785 nm,400 mW として,160°Cに保温した結晶長 3-mm,反転分極周期 19.5- μm の type-0 periodically poled lithium niobate(PPLN)を非線形媒質として内包した Z 字型共振器を構築した.ただし共振器長は,入射パルスと共振器内のパルスの位相が揃うように, $(3.0 \times 10^8 / 80 \times 10^6) / 2 = 187.5 \text{ mm}$ 程度とした.縮退状態で安定発振させるために,フィードバック制御を行っていった.まず共振器からの出力光の一部をグレーティングにより波長ごとに分離し,スリットを通して,1.57- μm 帯の光を取り出した.これを入力信号として2つの異なる周波数応答を持つ piezo 素子で PID 補償を行った.速い信号を補償する短い piezo 素子(型番: PK2JA2P2, 移動量: 8 μm /75 mW, 応答性: 140 kHz まで),遅い信号を補償する長い piezo 素子(型番: PK2FVP2, 移動量: 44.8 μm /75 mW, 応答性: 30kHz まで)を用いた.ただし短い piezo には,ハイパスフ

ルタ(カットオフ周波数 7Hz)を通したものを送り,速い信号のみに追従させるようにした.この結果,PID 補償中の 1.57- μm 光信号,各 piezo でのエラー信号の強度ゆらぎは Fig.4 のように得られた.1.57- μm 光の強度ゆらぎは,5% 程度の安定性を達成し,これは長時間安定した.パワーは 6 mW 程度で,パルス幅 200 fs(FWHM),波長幅 23 nm(FWHM) となった.またスペクトルは Fig. 5 のようになり,1.57- μm 中心でほぼ縮退状態となった.

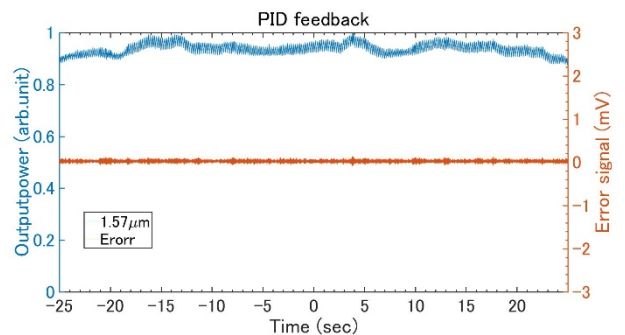


Figure 4. Stability of 1.57- μm

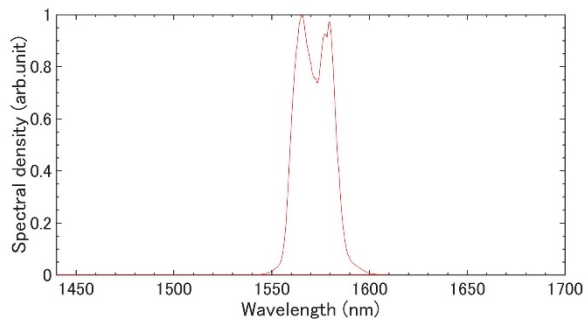


Figure 5. Spectrum of 1.57- μm

4. SPDCによる真空スクイズド光生成, バランス型ホモダイン測定

まず, スクイズングレベルの指標とするため, 光パラメトリック増幅(OPA)によるパラメトリックゲイン変化の測定を行っていった. Fig.6のようなセットアップを組み, 縦偏光の 785-nm pump 光と SPOPO からの 1.57- μm LO 光(縮退発振, 6mW 程度)を LPF で混ぜ合わせ, 結晶長 1-mm, 反転分極周期 20.1- μm の type-0 PPLN に入射した. pump 光の位相を変化させていったとき, 1.57- μm 光の強度変化を InGaAs PD で測

定すると, 位相感応な増幅が Fig. 7 のように見られた (pump 光パワー463 mW). また pump 光のパワーを 0 mW から 463 mW まで 50 mW 刻みで変化させたとき, Fig.8 のようなパワーに依存した増幅が見られた. ここで, G_{MAX} はゲインの最大値, G_{min} は最小値である. pump パワーが 463 mW のとき $G_{\text{MAX}} = 2.7 \text{ mW}$, $G_{\text{min}} = 0.64 \text{ mW}$ となった.

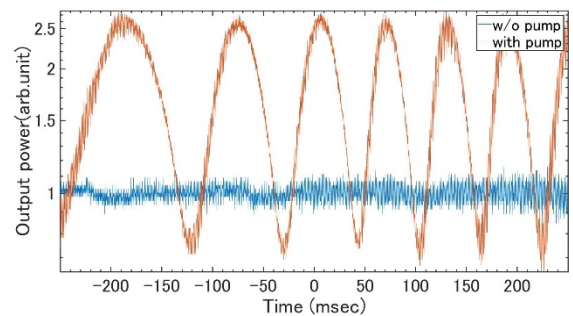


Figure 7. OPA phase sensitive amplitude

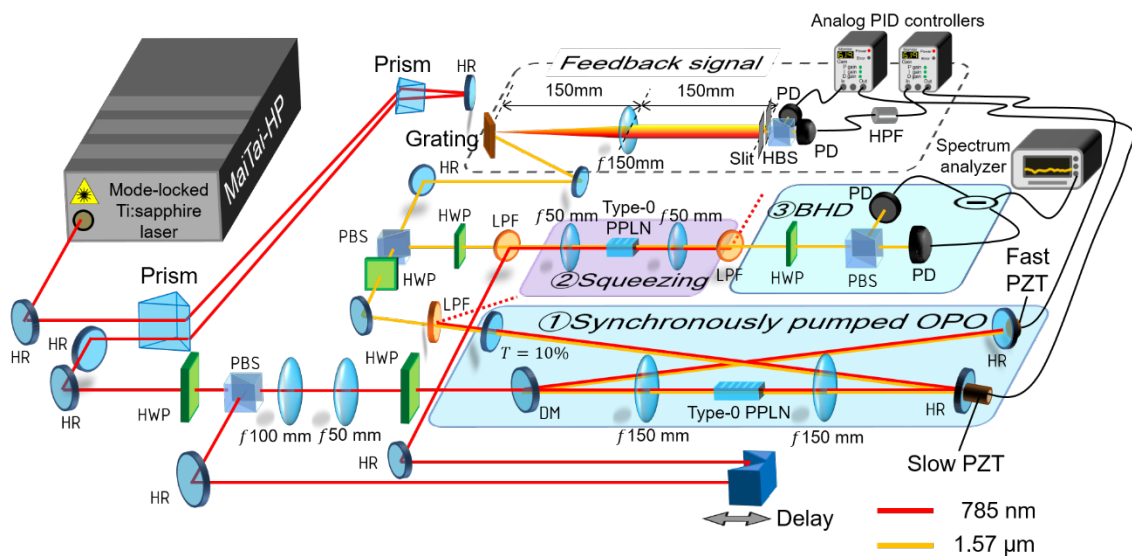


Figure 6. Set up for Squeezing measurement

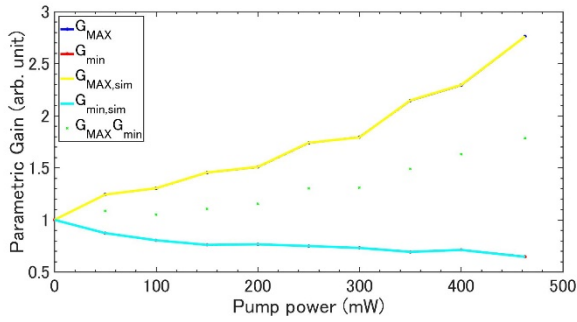


Figure 8. Classical parametric gain versus pump average power

次に η を pump と 1.57- μm のビームがが完全にオーバーラップした時に 1 で,全くオーバーラップしない時に $1 - \eta$ となるような係数として,

$$P_{\text{out}} = \eta \exp(\pm 2r) P_{\text{in}} + (1 - \eta) P_{\text{in}} \quad (7)$$

$$G_{\text{MAX,min}} = \eta \exp(+2r, -2r) + (1 - \eta) \quad (8)$$

から, Fig.8 にフィットするような η, G を求めると,計算値は Fig.9 のようになり, Fig.9 の G と Fig.8 の G_{MAX} は近い挙動を示した。

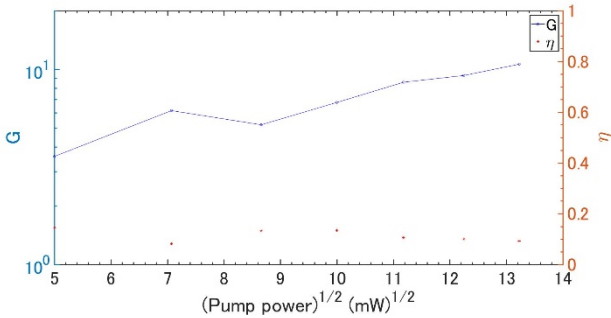


Figure 9. Estimated parametric gain $G(=\exp(2r))$ and effective η versus the square root of the pump

次にスクイズド光生成, 測定を行っていく. Fig.6 のセットアップで, 785-nm pump(パワー可変)を縦偏光, SPOPO からの 1.57- μm 光(6 mW)を横偏向の状態 で type-0 PPLN に入射する. 縦偏光のみ位相整合となり非線形光学効果を受け, 1.57- μm のスクイズド光

が生成され, 1.57- μm LO 光はそのまま透過する. その後, 1.57- μm スクイズド光と 1.57- μm LO 光の偏光を HWP で傾け, PBS で混ぜ合わせる. それをバランス型ホモダイン測定していった. ただし, バランス型ホモダイン検出器として, 量子効率 76% の浜松ホトニクス製の G8370 シリーズの InGaAsPD で構成されたものを用いた(CMRR は約 20dB). pump パワーが 175 mW の時, Fig.10 のようにノイズ変化が見られ, 3.5dB のアンチスクイーミング, -0.48dB のスクイーミングが測定された. ただし, このノイズレベルは, 電気ノイズとショットノイズレベルを除いたものである。

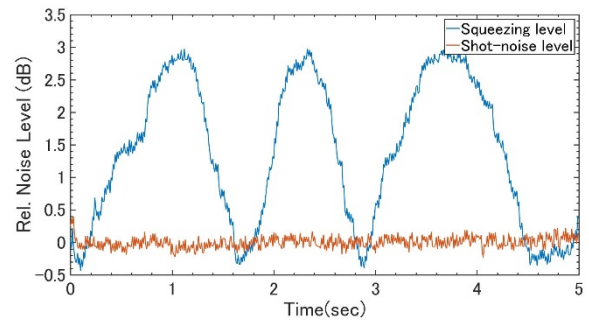


Figure 10. Squeezing level with 175mW pump

また pump 光を, 25mW から 175mW まで 25mW 刻みとしてそれぞれのノイズレベルを計測していったところ, Fig.11 のような結果を得た. アンチスクイズドレベルが pump 光のパワーに対応して増加しているのに対して, スクイズドレベルは 0.5dB で横ばいとなってしまうことが分かる. 式(7,8)より η を求めると, Fig. 11 のようになり, η は 10% 程度であることが分かる. これがスクイズドレベルの劣化に影響を与えていると考えられる. η はあらゆるモードマッチング効率および, 検出までのロスで表される. 光学系でのロスは 10% 程度とそこまで高くなく, また測定に使った検出器の量子効率は 76% と比較的高いこ

とから,モードマッチングの影響が大きいのではと考えられる.モードマッチングには,空間的なものと,周波数的なものがある.空間的なモードマッチングは波面整形により改善でき,周波数的なモードマッチングは,波形整形により改善可能である.

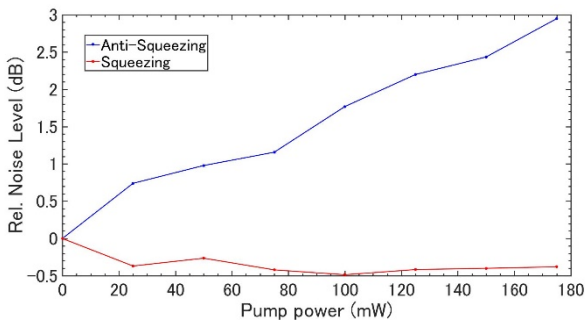


Figure 11. Squeezing level while changing pump power

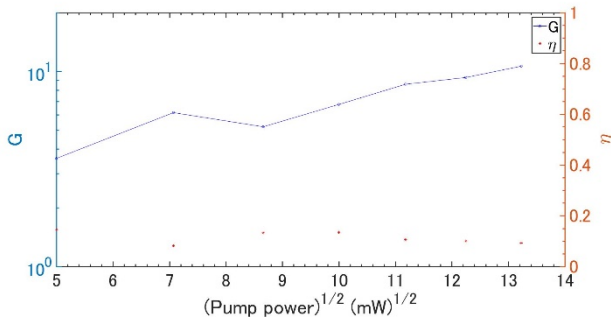


Figure 12. Estimated parametric gain $G(=\exp(2r))$ and effective η versus the square root of the pump average power.

5. 結論

本研究では Ti:Sapphire レーザ(MaiTai) による中心波長 785 nm の pump 光(ω) を直接非線形結晶 type-0PPLN に入射し,SPDC により中心波長 1.57- μm のスクイズド光($\omega/2$) を生成し,それを縮退 SPOPO により生成した LO 光($\omega/2$) とバランス・ホモダイン

測定することで,使用するレーザの 2 倍の波長域でスクイズド光を生成・測定する新手法の提案を目的として行われた.SPOPO 共振器の安定性課題は,共振器内に速い応答に対応する短いピエゾ,遅い応答に対応する長いピエゾの 2 つの応答特性をもつピエゾを使った PID 補償により,1.57- μm 光の強度ゆらぎは 5% まで抑えられ,また長時間の安定を達成した.

次に,結晶長 1mm の type-0 PPLN に 785-nm pump 光を直接入射し,スクイズド光を生成した.縮退 SPOPO で生成した LO 光と PBS で混ぜ合わせ,バランス型ホモダイン測定を行ったところ,0.5dB ほどのスクイーミングが測定された.しかし,この purity は悪く,これはモードマッチングの悪さが影響していると考えられる.このモードマッチング性を高め,purity の高いスクイズド光生成が今後の課題となる.

References

- [1] S. L. Braunstein and P. van Loock, “Quantum information with continuous variables,” *Rev. Mod. Phys.* **77**(2), **513** (2005).
- [2] A. Furusawa, J. L. Sorensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble, and E. S. Polzik, “Unconditional quantum teleportation,” *Science* **282**(5389), **706** (1998).
- [3] N. C. Menicucci, P. van Loock, M. Gu, C. Weedbrook, T. C. Ralph, and M. A. Nielsen, “Universal quantum computation with continuous variable cluster states,” *Phys. Rev. Lett.* **97**(11), **110501** (2006).
- [4] T. Hirano, et.al., “3 dB squeezing by single-pass parametric amplification in a periodically poled KTiOPO4 crystal,” *Opt. Lett.* **30** (13) **1772** (2005).
- [5] E. M. Daly and A. I. Ferguson., “Parametric amplification and squeezing of a mode-locked pulse train: A comparison of MgO:LiNbO3 with

bulk periodically poled LiNbO₃ , " *Phys. Rev.* **A62**,
043807(2000).

- [6] Samuel T. Wong, et.al., "Self-phase-locked degenerate femtosecond optical parametric oscillator," *Opt. Lett.* **33**(16), **1896**(2008).