

周期反転分極 KTiOPO₄結晶を用いた周波数多重スクイーズドパルス生成

Frequency multiplexed squeezed pulse generation by a periodically polled KTiOPO₄.

大見 聡仁(M2), 山岸 佑多(B4), 保坂 有杜

Abstract

We experimentally demonstrate programmable multimode phase-sensitive amplification multiplexed in the frequency domain for flexible control of a multimode squeezed state. We utilize the unique phase-matching condition of a type-II PPKTP crystal and pulse shaping technique to fully control the frequency-domain parallel generation of squeezed states in the optical telecommunication band. We experimentally verified the independent programmability of squeezers with a coherent probe beam from a degenerate synchronously pumped optical parametric oscillator.

1. Introduction

量子通信における速度向上や量子コンピュータ、シミュレータにおける処理情報の大容量化に向けて制御された光量子モードの並行多重生成手法に注目が集まっている[1-4]。その中で Gaussian boson sampling では、線形量子回路へ多重スクイーズド光を入力することで、分子振電遷移計算への応用が可能となることが報告されており[5]、このようなアプリケーションに向けて、可変スクイーズド光多重生成が求められる。多重化は、空間域[6, 7]、時間域[8]、周波数域などの自由度が扱われるが、コンパクト性とプログラマブル性への適性から我々は周波数域での実装に注目している。

スクイーズド光は Spontaneous parametric down conversion(SPDC)による生成が代表的であるが、これにより生成される光子ペアの周波数組み合わせはそのハミルトニアンから計算することができる。ハミルトニアンは、

$$\hat{H} = \int_0^\infty \int_0^\infty d\omega_s d\omega_i f(\omega_s, \omega_i) \hat{a}_s^\dagger(\omega_s) \hat{a}_i^\dagger(\omega_i) + H. C. \quad (1)$$

と記述される。周波数組み合わせを示すのは Joint spectral amplitude(JSA)と呼ばれる $f(\omega_s, \omega_i)$ であり、 $f = \phi(\omega_s, \omega_i)\alpha(\omega_s + \omega_i)$ という積で表される。前者は、Pump 光のスペクトル、つまり pump 光の角周波数からエネルギー保存則的観点で、どのような組み合わせで signal, idler 光が生成されるかを示す

pump envelope amplitude(PEA)である。後者は、pump, signal, idler 光が結晶中でどのように伝搬し、相互作用するかという、非線形媒質の複屈折由来の群速度により定まる phase matching amplitude(PMA)である。ここで ω は角周波数、 \hat{a}^\dagger は生成演算子である。PEAは、単一周波数モードでは

$$\alpha(\omega_s + \omega_i) = \exp\left[-\left(\frac{\omega_s + \omega_i - \omega_p}{\sigma_p}\right)\right] \quad (2)$$

と表され、PMAは、

$$\phi(\omega_s, \omega_i) = \text{sinc}\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) \quad (3)$$

と表される。ここで Δk は、服屈折率による波数分散、 L は媒質長である。JSA を schmidt 分解すると、 $f(\omega_s, \omega_i) = \sum_j c_j \phi_j(\omega_1)\phi(\omega_2)$ と直交基底に分解することができる。ここで j はモード数、 c_j はモード重み付け係数である。構成するモード数は、schmidt number

$$K = \frac{1}{\sum_j c_j} \quad (4)$$

から計算することができる。この逆数は purity である。Roslund らは、schmidt number の大きな type-I bismuth borate(BIBO)の位相整合に着目し、ポストセレクションホモダイン測定により、周波数 8 モードのスクイーズド光生成を報告している[9,10]。ここでは、Fig.1 (a)のように広い周波数帯域相関を持った SPDC が起きている。ここにおいて光子ペアは様々な周波数由来の混合状態であり、pump 光を制御するだけではそれぞれのモードのスクイージングレベルを制御することは困難である。任意に制御されたスクイーズド光生成には、Fig. 1(b)のような 1 対 1 対応な周波数間のみ周波数相関を持つ機構が必要となる。

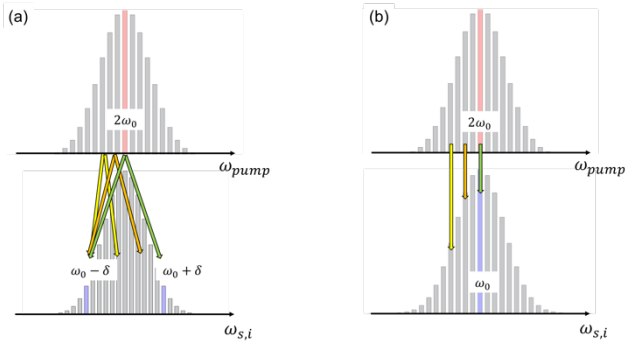


Fig. 1 Conceptual scheme of photon pair generation by SPDC with (a)spectral correlation, (b)no spectral correlation.

これを満たす位相整合を持つ非線形媒質として、通信波長帯における type-II Periodically polled KTiOPO_4 (PPKTP) が Rui らのグループにより報告されている[11]。Type-II では直交偏光で signal, idler 光が生成され、また KTP においてこれらは pump 光に対して対称的な群速度を持つために相互作用する周波数帯域が狭くなる。Rui らの実験では、700-1000 nm で波長可変のモード同期レーザーを pump 光として type-II PPKTP において SPDC を引き起こし、生成された光子の周波数スキャン coincidence matching 測定を行うことで 1565 nm~1615 nm において schmidt 数 1.05 程度を報告している。スクイーズド光生成においても、同様に単一モード生成が可能ではないかと想定される。

本研究では type-II PPKTP の特殊な位相整合と波形整形技術の組み合わせにより、制御可能な周波数多重スクイーズド光生成手法を提案し、実験的に原理実証を行なっている。

2. Numerical simulation

結晶長 7.2 mm の Type-II PPKTP を中心波長 785 nm のモード同期パルスレーザーで励起した時の、JSA、schmidt number K の計算をしていく。Type-II PPKTP におけるセルマイヤ方程式[12, 13]を使い、(2~4)式に代入して計算をしていく。バンド幅と K の関係性について計算を行なったところ、バンド幅 1.47 nm の時に $K = 1.23$ 、purity は 0.82 となり、単一モード性が最も高くなることがわかる。このバンド幅を採用した時、JSA は Fig. 2 のように得られた。

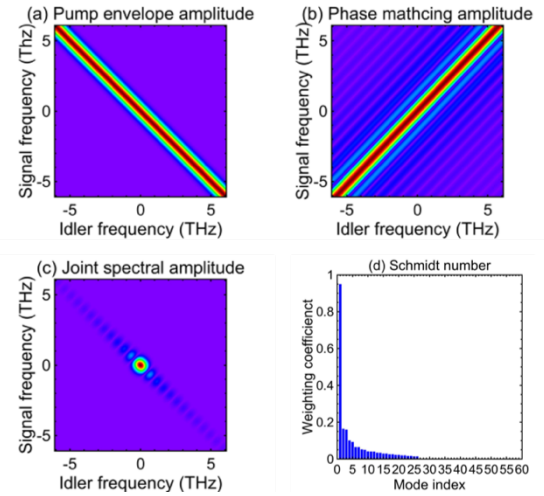


Fig. 2 (a) Pump envelope amplitude, (b) Phase matching amplitude, (c) Joint spectrum amplitude, (d) Schmidt number of 7.2 mm type-II PPKTP pumped by 785 nm (FWHM 1.47 nm)-mode locked pulse laser.

次に、pump 光をダブルガウシアンスペクトルに整形した周波数 2 モードにおける場合を考える。それぞれの中心波長を 783, 787 nm とし、バンド幅を 1.2 nm としたところ、Fig.3 のような結果が得られ、 $K = 2.35$ 、purity 0.43 となった。Schmidt number は 2 程度であり、2 つの単一状態が並行生成されることがわかる。

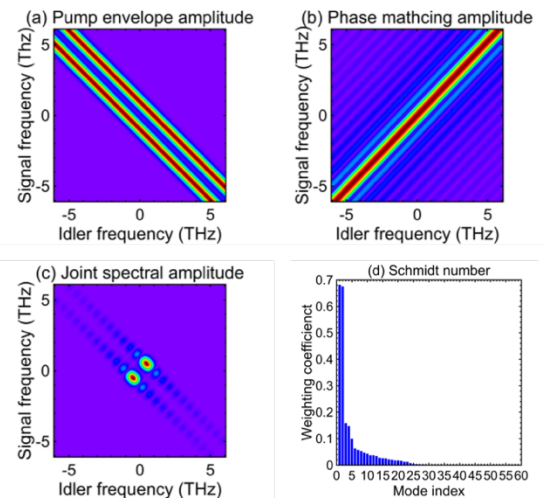


Fig. 3 (a) Pump envelope amplitude, (b) Phase matching amplitude, (c) Joint spectrum amplitude, (d) Schmidt number of 7.2 mm type-II PPKTP pumped by 783, 787 nm (FWHM 1.2 nm)-mode locked pulse laser.

3. Experiment and results, discussions

3.1. Probe 光生成

中心波長 785 nm, スペクトル幅 10 nm, パルス幅 100 fs, 繰り返し周波数 80 MHz を出力する Wavelength-tunable Ti:sapphire laser (Mai Tai HP, Spectra-Physics Inc.) を励起光源とする。これを PBS により、スキューズ測定に向けた pump, probe 光用に分岐する。スキューズ光は二倍波長で生成されるため、これに合わせ 1570 nm のコヒーレント光を probe 光として生成する必要がある。これは Synchronously pumped optical parametric oscillator(SPOPO)により生成可能である[14]。Fig. 4 は probe 光生成の実験セットアップを示している。

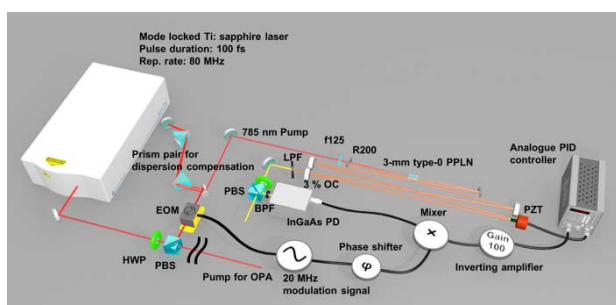


Fig. 4 The experimental setup for SPOPO. HWP(Half wave plate), PBS(Polarizing beam splitter),EOM(Electro magnetic modulator), BPF(Band pass filter), PZT(Piezo actuator), OC(Output coupler), LPF(Long pass filter), PD(Photo detector).

SPOPO 機構は、繰り返しパルスに応じた長さを持つ共振器と共振器長制御フィードバック回路からなる。共振器は非線形媒質として結晶長 3 mm, 反転分極周期 $19.47 \mu\text{m}$ の type-0 5 mol % MgO-doped congruent LiNbO₃ crystal, PPLN(HC Photonics, Inc.)、を内包したリング型共振器となっている。R 200 の凹面鏡ペアと高反射ミラー3 枚、透過率 3 % の Output coupler により構成され、 $1.57 \mu\text{m}$ 光はスポット径 $28.6 \mu\text{m} \times 31.3 \mu\text{m}$ 、レイリー長 4.87 mm で type-0 PPLN への集光している。またこれに合わせ 785 nm 光は f125 と凹面鏡の複合系によりスポット径 $26.2 \mu\text{m}$ で入射する設計とした。

次にフィードバック系の説明をしていく。probe 光として利用するためには 785 nm pump 光と Carrier envelope phase(CEP)を揃える必要がある。そのためには、signal, idler 光を縮退状態にして共振器長をロックする必要がある。共振器長は定盤の微かな揺らぎや、微風、光学マウントの揺らぎなどによる外乱の影響を受け変化するために、PDH lock method[15]によって共振器長制御を行う。まず EOM(EO-PM-R-20-C1, Thorlabs, Inc.) に $\Omega = 20 \text{ MHz}$ の電気変調信号を印加し、位相変調を施す。

SPOPO からの出力光の一部を、1570 nm 中心、FWHM 3 nm の Band pass filter(NIR01-1570/3-25, Semrock Inc.)を通し、amp 付 InGaAs PD(gain 104, cutoff150MHz, PDA05CF2, Thorlabs, Inc.)で強度信号として取得する。それを 20 MHz の変調電気信号と Mixer(ZP-3+, Mini-Circuits, Inc.)でミキシングすることで出力光をその微分信号としてエラー信号を取得することができる。なお自作 Phase shifter を挿入することで、2 信号の位相差を補償しエラー信号を最大化している。エラー信号の 0 点を setpoint として PID controller(SIM960, Stanford Research Systems)を通じ、piezo electric stack(AE0203D08F, Thorlabs, Inc.)電圧印加することで共振器制御を行う。これにより中心波長において強度が最大となるような、つまり縮退状態でのロックが可能となる。

結果として、入射 pump パワーを 350 mW とし SPOPO を縮退状態で共振器制御した結果、probe 光パワーは 3 mW 程度で生成された。出力波形、スペクトラムは Fig. 5 のように得られた。30 分程度の安定制御に成功し、スペクトルは縮退状態で中心波長 $1.57 \mu\text{m}$ バンド幅は 44 nm(FWHM)であった。SPOPO 内に fused silica の wedge plate を挿入することで、バンド幅の広帯域化を測ることができ、現実系では 60 nm 程度までの広帯域化を確認した。

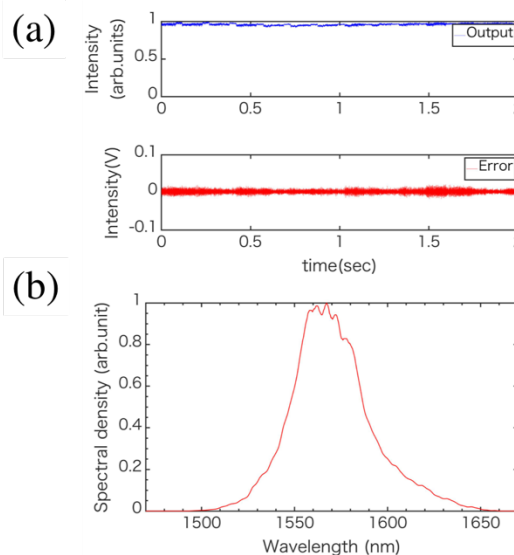


Fig. 5 (a) Intensity waveform of probe and error signal and (b)spectrum of probe

3. 2. 周波数単一モードスキューズ光生成・測定

Fig. 6 は type-II PPKTP における周波数単一モードスキューズ光測定のセットアップを示している。

SPOPOにより生成した $1.57\ \mu\text{m}$ probe 光(FWHM 6 nm, 0.73 THz, BPFにより狭帯域化した)と $785\ \text{nm}$ pump 光(FWHM 10 nm, 4.8 THz)を Dichroic mirror で合波したのち、f 50 Achromatic lens によりそれぞれスポット直径 $15\ \mu\text{m}$, $21\ \mu\text{m}$ で結晶長 $7.2\ \text{mm}$ の type-II PPKTP(温度位相整合条件 $32\ ^\circ\text{C}$)に集光した。SPDCにより生成された光子ペアは不可分状態でスクイージングする。そのため、透過光は HWP、PBS により偏光縮退を行なっている。その後、InGaAs PD により probe 光の増幅を測定することでスクイージングゲインの測定が可能となる。しかしこの実験ではさらに一つの工夫が必要となる。type-II KTP 結晶における群速度差により、probe 光パルスの縦偏光成分と横方向成分が結晶伝搬中に乖離してしまう。これを防ぐために $7.2\ \text{mm}$ type-II PPKTP の前後に $3.6\ \text{mm}$ KTP 結晶を挿入することで位相補償を行なった。前側に KTP を挿入し、PPKTP の中心で直交偏光の位相が一致させることで、時間モードマッチングの補償を行ない、後側の KTP では縮退のための位相補償の役割を行なっている。

pump パワーを $10\ \text{mW}$ から $440\ \text{mW}$ まで変えていったときの、probe 強度測定によりスクイージングゲインの測定を行った。pump 光が $440\ \text{mW}$ の時スクイージングレベル $-0.66\ \text{dB}$ 、アンチスクイージングレベル $2.04\ \text{dB}$ となり最大となった。pump, probe 間の位相差をスキャンした時のパラメトリックゲインは $400\ \text{mW}$ の場合であるが Fig. 7(a)のようになっている。また Fig. 7(b)のプロットは、pump 光パワーに対するスクイージング、アンチスクイージングゲインを測定したものである。スクイージングレベル、アンチスクイージングレベルは pump, probe 間のモードマッチング効率を η (パルス同士が完全に重なる時、1 となる)、非線形媒質のスクイージングパラメータを r 、pump パワーを P として、

$$G_{sq} = \eta \exp\left(-2r \times \sqrt{\frac{P}{P_{max}}}\right) + 1 - \eta \quad (5)$$

$$G_{asq} = \eta \exp\left(2r \times \sqrt{\frac{P}{P_{max}}}\right) + 1 - \eta \quad (6)$$

と表されるので[16]、 $P_{max} = 440\ \text{mW}$ としてその時のスクイージングゲイン、アンチスクイージングゲインを(5, 6)式に代入し、連立方程式を解くとスクイージングパラメータ $r = 0.72$ 、モードマッチング効率 $\eta = 0.18$ と得られる。このパラメータを使い、pump パワーを変数とした時のゲインをシミュ

レーションすると、Fig. 12(b)の実線部のようになった。理論曲線と実験結果のプロットはほぼ一致している。これより pump 光パワーに対する、ゲインは、非線形な増加傾向を確認した。ここで、モードマッチング効率は、 $\eta = 0.18$ と低くなっている。モードマッチング効率は、空間、偏光、周波数のモードマッチング効率積で表されるが、本実験系においては空間モードマッチングの影響が高い。更なる改善には集光点におけるビームサイズ、波面の同一化が必要だと考える[17,18]。

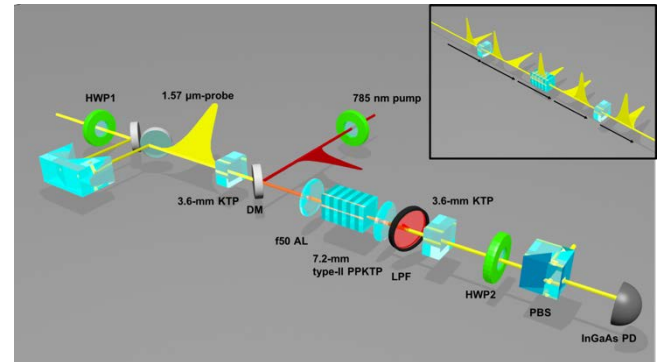


Fig. 6 The experimental setup for squeezing in $7.2\ \text{mm}$ type-II PPKTP. HWP(Half wave plate), DM(Dichroic mirror), AL(Achromatic lens), LPF(Long pass filter), PBS(Polarizing beam splitter), PD(Photo detector). Caption: Phase shift compensation by KTP pairs.

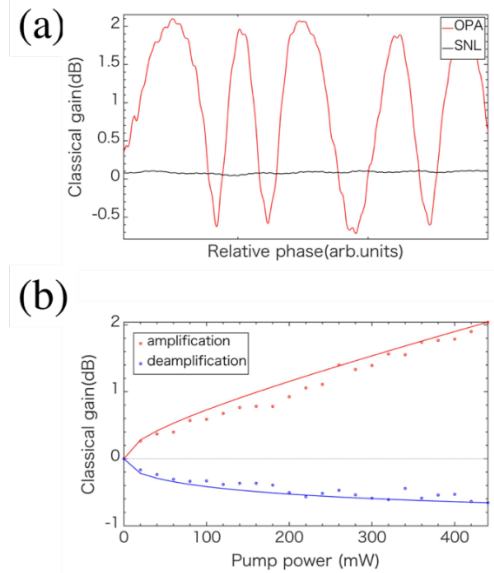


Fig. 7 (a) Classical parametric gain versus relative phase at pump power of $400\ \text{mW}$, (b) classical parametric gain versus pump power.

3. 3. 周波数 2 モードスクイーズド光生成・測定

ここでは 4-f 波形整形により pump, probe 光のスペクトルをダブルガウシアン形状にすることで、type-II PPKTPにより周波数2モードのスクイーズド光の生成を確認する。また同時に pump 光の位相を変調することでスクイーズド光の位相制御も可能であることを示していく。Fig. 8 は実験セットアップを示している。

3.3.1. 4f 波形整形によるスペクトル整形

回折格子のような波長分散素子とレンズにより 2f 位置に波長ごとのスポットが横並びするようなフーリエ面を形成させ、そこに回折効率をプログラマブルに変調できる液晶転写型 SLM である LCOS-SLM(Liquid crystal on Silicon-spatial light modulator)を設置することでスペクトルの振幅・位相整形が可能になる。その後 2f 系を折り返すことで 1 パルスに再結合される。これは 4f 波形整形と呼ばれ、モード同期レーザーのようなパルスレーザーは広い周波数スペクトルに対する周波数制御技術として広く使われている[19]。

これを使ってまずは probe 光の整形を行なった。ビーム直径は 4.72 mm、FWHM 58 nm の probe 光を角度分散 0.74 nm/rad の反射型回折格子(1 次回折効率 60% 以上)、f200 のシリンドリカルレンズに入射し、LCOS-SLM(LCOS-100, Santec Inc.)へ 1 ピクセルあたり 0.038 nm の分解能でフーリエ面は形成した。ダブルガウシアンスペクトル形状になるよう SLM を設計した結果、Fig. 9(a)のように中心波長 1566 nm, 1574 nm, スペクトル幅 2.8 nm (0.34 THz), 2.2 nm (0.27 THz) のダブルガウシアンスペクトルへの整形ができた。probe 光のスペクトルに合わせるように、pump 光の整形を行っていく。入射ビーム直径を 3.3 mm で FWHM 6.4 nm とし、これを角度分散 0.47 nm/rad の透過型回折格子(1 次回折効率 90% 以上)、f200 のシリンドリカルレンズに入射することで、1 ピクセルあたり 0.3 nm の分解能でフーリエ面は形成された。結果、Fig. 9 (b)のように中心波長 783 nm, 787 nm, スペクトル幅 1.2 nm (0.61 THz), 1.2 nm (0.58 THz) のダブルガウシアンスペクトルへの整形ができた。ただこの波形整形器の伝送効率が 20% 程度となっており、このロス抑制は今後の課題となる。

以降長波長側を mode 1, 短波長側を mode 2 と呼ぶ。

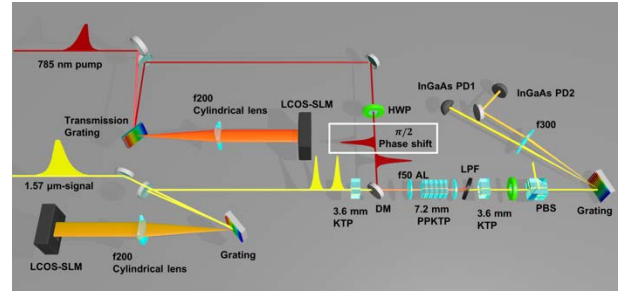


Fig. 8 The experimental setup for frequency 2 mode pulse shaping, squeezing, detection. LCOS-SLM(Liquid crystal on silicon-spatial light modulator), HWP(Half wave plate), DM(Dichroic mirror), PBS(Polarizing beam splitter), PD(Photo detector).

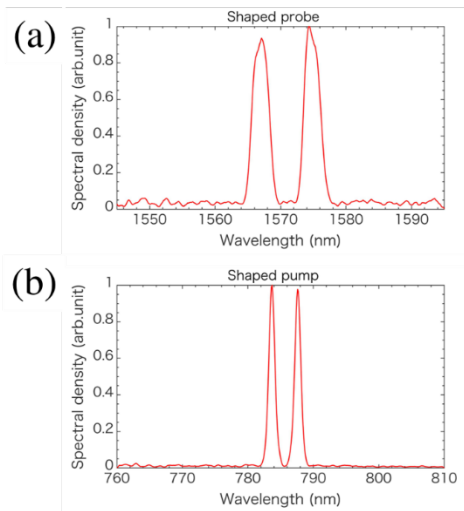


Fig. 9 The spectrum of (a) shaped probe 1566nm (FWHM 2.8 nm), 1574 nm(FWHM 2.2 nm), (b)shaped pump 783 nm(FWHM 1.2 nm), 787 nm(FWHM 1.2 nm).

3.3.2. 周波数2モードスクイーズド光測定

周波数2モードに整形した probe 光と pump 光により type-II PPKTP を励起し周波数2モードのスクイーズド光を生成する。ただしここで各モードの pump パワーは 30 mW とした。またこの測定は、出力光を回折格子により長波長側、短波長側に分離し、それぞれ異なる InGaAs PD で強度測定することで周波数2モードのスクイージング同時測定を行なった。また pump 光は波形整形により、(a) mode 1,2 同位相、(b) mode 1,2 反転位相、(c) mode 1 のみ、(d) mode 2 のみ、(e) mode 1,2 とともに振幅 0 の 5 パターンで測定を行なった。

相対位相とパラメトリックゲインの関係は、Fig. 10 のように得られた。(a)の時、mode 1, 2 において同位相なゲイン変化が見られた。スクイージングレベルは -0.2 dB、アンチスクイージングレベルは 0.18 dB 程度となり、Fig. 12(b)とほぼ一致する結果

となった。スクイーディングレベルはやや変化した
がこれは測定のための分離のところまで完全な分離
が行えていないことが原因と考えられる。次に(b)
では、片側がスクイーディングしているとき、同時
に他方はアンチスクイーディングを示しており、ゲ
インの位相反転が確認された。これにより、**pump**
光を位相変調することで、スクイーディングの位相
制御が可能になることが実証された。次に、
Fig.15(c,d)のように **pump** 光の片側の振幅を消した
ときの結果を比較することで、同モード間のみで
スクイーディングが起きることが分かる。異なる周
波数間で相関を持たず、単一モードが2つ並行生成
できることがわかる。

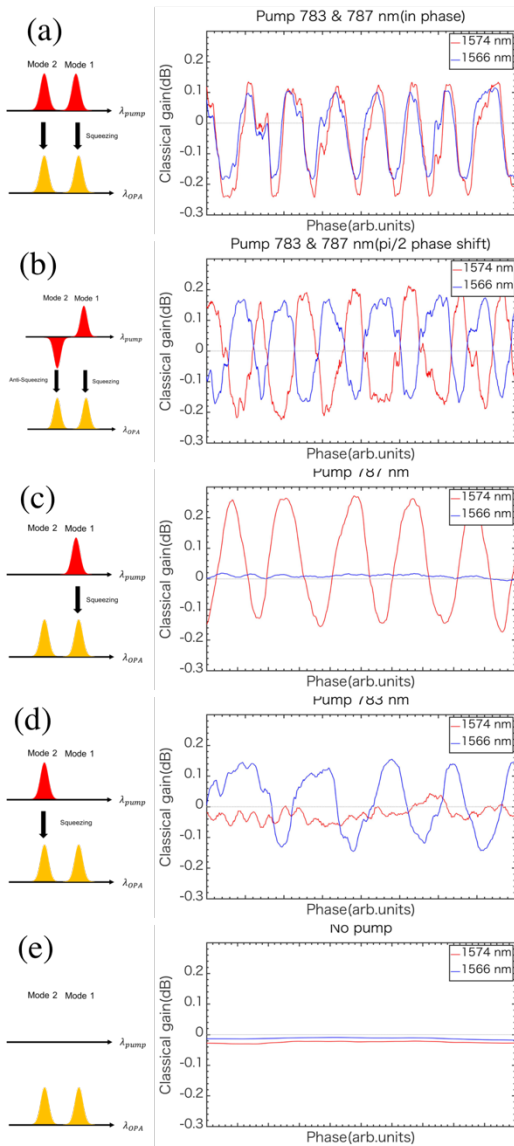


Fig. 10 Classical parametric gain versus relative phase pumped by (a)787 and 783 nm(in phase) (b)787 and 783 nm(inverse phase), (c) only 787 nm, (d)only 783, (e)none.

これより、**type-II PPKTP** の位相整合を利用すること
で、**pump** 光を2モードに整形することで、周波
数2モードのスクイーズド光が生成されること、
pump 光の振幅・位相を変調することでスクイー
ディングレベルの大きさ、位相を並行制御可能である
ことが実証された。

4. Conclusion

本研究では、モード同期パルスレーザーの広い周波
数帯域幅を利用した周波数域で多重なスクイーズド
光生成手法について実験的実証を行った。**type-II**
PPKTP 結晶の位相整合に着目し、**pump** 光の振幅・
位相変調することで、周波数域で1対1対応に制御
された多重スクイーズド光を生成する原理実証を
行なった。

本実験においてスクイーディングゲインは、**pump** 光
と **probe** 光のモードマッチングにより制限を受けた。
改善にはビームサイズ、波面などの空間モードマ
ッチング精度向上が必要となる。また **pump** 光パワ
ーに対するゲインの飽和は見られなかったため、
導波路結晶による置き換えや外部共振器による改
善方法も考えられる。

またモード数増加に向けてはさらに周波数分割を
進めればが、周波数分割幅と **purity** は高次分散の影
響によりトレードオフの関係を取る。モード数向
上には分散補償を要する。

References

1. Irfan Ali-Khan, Curtis J. Broadbent, and John C. Howell, "Large-Alphabet Quantum Key Distribution Using Energy-Time Entangled Bipartite States", *Phys. Rev. Lett.* **98**, 060503(2007).
2. Sören Wengerowsky, Siddharth Koduru Joshi, Fabian Steinlechner, Hannes Hübel & Rupert Ursin, "An entanglement-based wavelength-multiplexed quantum communication network", *Nature*, **564**, 225–228(2018)
3. Benjamin P. Lanyon, Marco Barbieri, Marcelo P. Almeida, Thomas Jennewein, Timothy C. Ralph, Kevin J. Resch, Geoff J. Pryde, Jeremy L. O'Brien, Alexei Gilchrist & Andrew G. White, "Simplifying quantum logic using higher-dimensional Hilbert spaces", *Nat. Physics*, **5**, 134-140(2009).
4. Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa, "Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain", *Nat. Photonics*, **7**, 982–986(2013)
5. Joonsuk Huh, Gian Giacomo Guerreschi, Borja Peropadre, Jarrod R McClean, and Al'an Aspuru-Guzik. "Boson sampling for molecular vibronic spectra." *Nat. Photonics*, **9**(9):615, 2015.

6. Mitsuyoshi Yukawa, Ryuji Ukai, Peter van Loock, and Akira Furusawa, "Experimental generation of four-mode continuous-variable cluster states", *Phys. Rev. A*, **78**, 012301(2008).
7. Xiaolong Su, Yaping Zhao, Shuhong Hao, Xiaojun Jia, Changde Xie, and Kunchi Peng, "Experimental preparation of eight-partite cluster state for photonic qumodes", *Opt. Lett.*, **37**(24), 5178-5180(2012).
8. Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa, "Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain", *Nat. Photonics*, **7**, 982–986(2013).
9. Jonathan Roslund, Renné Medeiros De Araujo, Shifeng Jiang, Claude Fabre, and Nicolas Treps. "Wavelength-multiplexed quantum networks with ultrafast frequency combs." *Nat. Photonics*, **8**(2):109, 2014.
10. La Volpe, Luca, et al. "Multimode Single-Pass Spatio-temporal Squeezing." arXiv preprint arXiv:2001.03972 (2020).
11. Rui-Bo Jin, Ryosuke Shimizu, Kentaro Wakui, Hugo Benichi, and Masahide Sasaki, "Widely tunable single photon source with high purity at telecom wavelength.", *Opt. Express*, **21**(9):10659–10666(2013).
12. K Fradkin, A Arie, A Skliar, and G Rosenman. "Tunable midinfrared source by difference frequency generation in bulk periodically poled ktiopo 4." *Applied physics letter*, **74**(7):914–916, 1999.
13. Friedrich König and Franco NC Wong. "Extended phase matching of second-harmonic generation in periodically poled ktiopo 4 with zero group-velocity mismatch." *Applied physics letters*, **84**(10):1644–1646, 2004.
14. Samuel T Wong, Konstantin L Vodopyanov, and Robert L Byer. "Self-phase-locked divideby-2 optical parametric oscillator as a broadband frequency comb source." *JOSA B*, **27**(5):876–882, 2010.
15. Eric D Black. "An introduction to pound–drever–hall laser frequency stabilization." *American journal of physics*, **69**(1):79–87, 2001.
16. Yujiro Eto, Takashi Tajima, Yun Zhang, and Takuya Hirano. "Observation of quadrature squeezing in a χ (2) nonlinear waveguide using a temporally shaped local oscillator pulse." *Opt. Express*, **16**(14):10650–10657, 2008.
17. Chonghoon Kim, Ruo-Ding Li, and Prem Kumar. "Amplification response of a traveling-wave phasesensitive optical parametric amplifier." *Opt. Lett.* **19**(2):132–134, 1994.
18. Gideon Alon, Oo-Kaw Lim, Amar Bhagwat, Chao-Hsiang Chen, Muthiah Annamalai, Michael Vasilyev and Prem Kumar. "Optimization of gain in traveling-wave optical parametric amplifiers by tuning the offset between pump-and signal-waist locations.", *Opt. Lett.*, **38**(8):1268–1270, 2013.
19. Eugene Frumker and Yaron Silberberg, "Phase and amplitude pulse shaping with two-dimensional phase-only spatial light modulators", *JOSA B*, **24**(12), 2940-2947(2007).