

外部共振器による励起用光源の高強度化と 縮退光パラメトリック共振器による半波長光の安定生成

Enhancement cavity for squeezor and stable generation of local oscillator
with SPOPO

大見 聡仁(M1), 保坂 有杜(D3), 富田 雅也(M2), 新村 星太郎(M1)
Akihito Omi, Aruto Hosaka, Masaya Tomita, Shintaro Niimura

Abstract

We constructed an enhancement cavity containing a SPDC squeezed pulse generator with a type-II PPKTP and achieved an enhancement factor of ~5. We also demonstrated stable locking of SPOPO by employing a dither lock method.

1. はじめに

大規模量子システムの構築は、量子通信における速度向上[1]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規模化[2]などにおいて必須技術である。これらは原子や電子、光子などにおける自由度を多重化することで実現される[2]。特に光子を利用したものは、長距離伝送や常温での取り扱いが可能な点や、自由度操作性の良さから広く研究が進められている。光子の自由度には、空間域[3]、時間域[4]、周波数域での多重化が主に挙げられる。我々はパルス幅 140 fs の広帯域パルスレーザーを利用しており、周波数域での多重化に重点を置き研究を進めている。

周波数多重化には、Synchronously pumped optical parametric oscillator (SPOPO)により、 $\omega_{pump} = \omega_{signal} + \omega_{idler}$ というエネルギー変換を満たす様々な周波数組み合わせで量子光を生成する、非縮退性を利用したものがある[5]。この手法では、広帯域ペアで周波数相関が生まれるため任意の周波数モードを操作するにはポストセレクションが必要となる。一方で、任意の周波数モードで量子光源を生成する方法として、励起光の波形整形を用いた、通信波長帯域における type-II PPKTP の位相整合を利用したものがある[6]。すなわち Figure 1 のように励起光の周波数モードに応じて狭帯域で相関を持つ光ペア

が生成される。励起光を波形整形などにより操作するだけで、任意の量子光源の操作生成が可能となる。

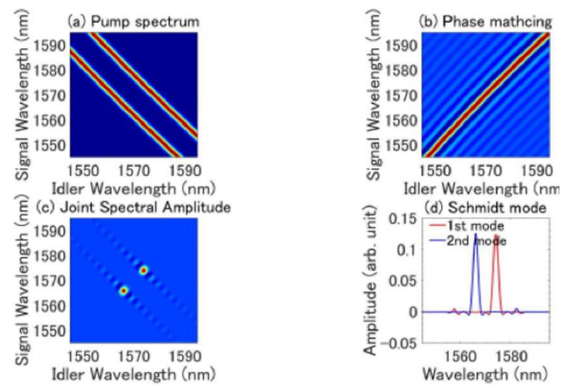


Figure 1 Examples of (a)pump envelope intensity, (b)phase matching intensity, (c) joint spectral amplitude, (d) schmidt mode of type-II PPKTP. In this case two-mode squeezed pulses will be generated.

Type-II の複屈折性を持つ結晶を利用する上で時間ウォークオフ効果の影響があり、相互作用長が長くできない。これを補うためには高強度励起光が必要である。本レポートでは外部共振器による高強度 pump 光生成について報告する。また量子レベル測定のため局部発振光(LO 光)の生成も必要であり、この発生についても報告する。

2. 外部共振器による高強度励起光生成

パルスの繰り返し周波数に応じた光路長を持つリング共振器では、パルスの重ね合いにより

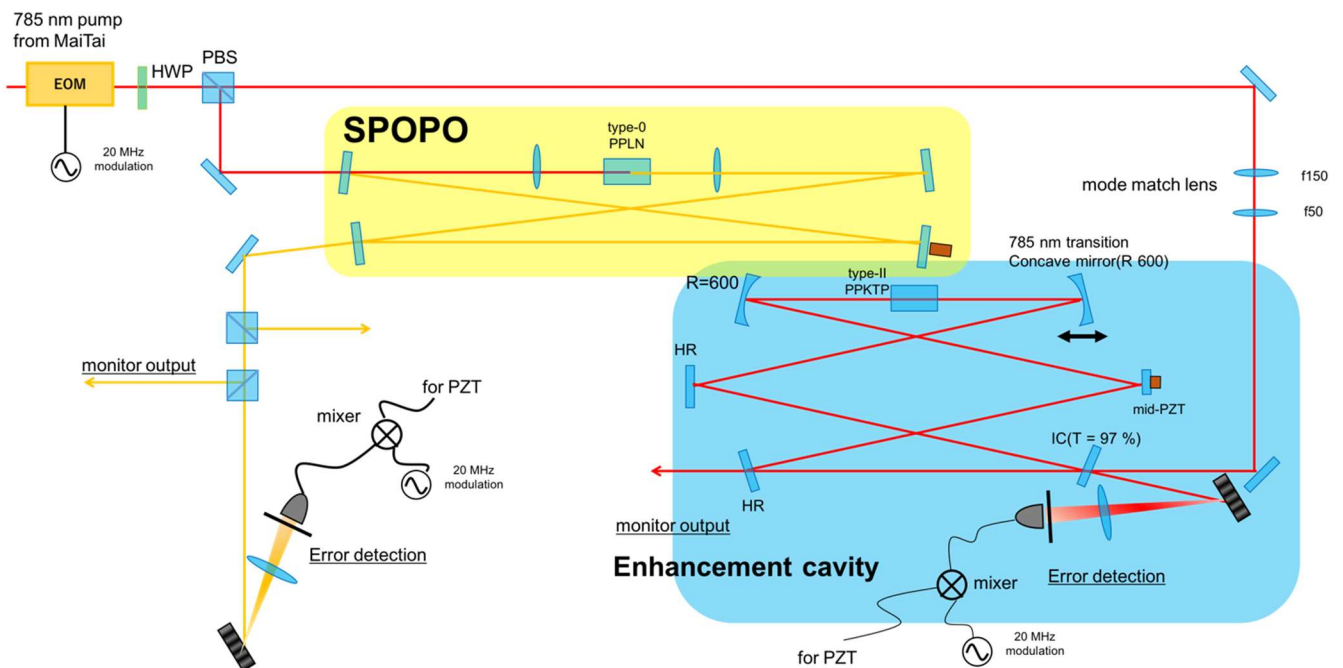


Figure 2 Experimental setup

パワー増強が可能となる。励起光の波長帯のみを増幅し、PPKTPにより発生するSPDC光は透過するような反射特性を持つ素子を利用するように外部共振器は設計される[7]。

2.1. 外部共振器設計

Fig. 2 のようなリング共振器を設計した。曲率半径を 600 mm の凹面鏡 ($R > 99\%$ at 785 nm, $T > 95\%$ at 1570 nm) 対と 99.9% 以上の反射率を持つ高反射鏡、97% の反射率の入射鏡、屈折率 1.74、結晶長 20 mm の type-II PPKTP により外部共振器を構築するものとした。ここで入射光源はフェムト秒モード同期 Ti:Sapphire レーザー（繰り返し周波数 80 MHz, 中心波長 785 nm, パルス幅 140 fs を）であり、この繰り返し周波数より 3.75 m が共振器長となる。

ABCD 行列により共振器内モード径を計算すると、入射ビーム径 1 mm で、結晶を凹面鏡の焦点距離付近に配置することで共振器の安定条件を満たすことが確認された。ここで非点収差補償角はメカニカルな配置から最小角度となるように設定しており、 $2\theta = 7.59^\circ$ としている。

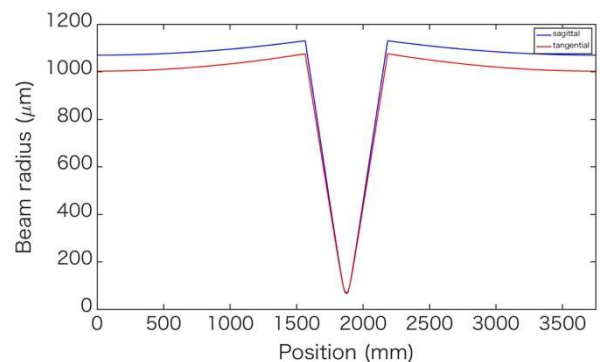


Figure 3 Beam radius in a cavity

共振器内には PPKTP 結晶を挿入することから、群速度分散により波長ごとに位相差が生じる。波長ごとの位相は、

$$\Phi(\omega_n) = \phi(\omega_c) + \phi'(\omega_c)(\omega_n - \omega_c) + \Delta\phi(\omega_n)$$

となり、第一項は群遅延による位相を第二項は高次分散による分散を示している。第二項は

$$\Delta\phi(\omega_n) = \phi''(\omega_c)(\omega_n - \omega_c)^2/2$$

と表せ、セルマイヤー方程式により各波長における屈折率を求め、計算すると Fig. 4 のような位相特性となる。

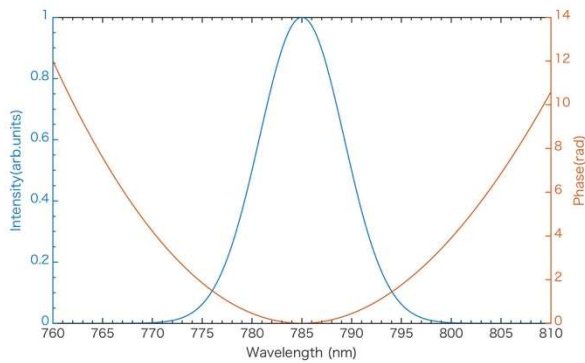


Figure 4 Phase change by group delay dispersion

一方、共振器によるパワー増幅度は、

$$U_n = \frac{T_{IC}}{1 + A - 2\sqrt{A}\cos(\phi(\omega_n))}$$

ここで、 A は共振器子を構成する素子全体の反射率と結晶での透過率、 T_{IC} は入射鏡の反射率である[8]。

共振器内色分散のため、パルス間の重ね合わせは悪化する。 U_n 値を大きくするためには位相差を小さくし \cos 項の値を大きくする必要がある。群遅延による位相差はピエゾ素子を使った共振器長制御で補償することができ、群速度分散によるものは分散補償により補償する必要がある。共振器を仮組みし入射鏡以外による損失を測定したところ5%程度となった。 $A = 0.95$ として、増幅度を計算すると Fig. 5 のようになった。中心波長では18倍程度の増幅が期待される。

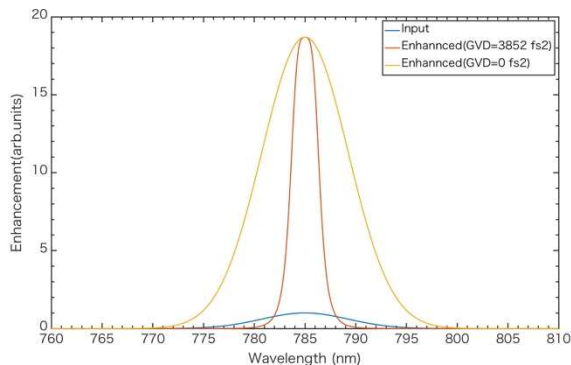


Figure 5 Enhancement depending on GDD

2.2. 外部共振器構築と安定化制御

設計した外部共振器を構築した。入射光には電気光学変調器による20 MHzの位相変調信号を加えた。入射鏡における透過・反射光の干渉光と変調信号を電気信号的に混ぜ合わせることで、共振器内光信号の微分項を得ることができ、その信号をエラー信号として共振器ロックを行った(PDH lock method)。その結果5分以上安定性が保たれ、共振時は非共振時に比べ5倍程度の増幅が得られた。共振器内ビームの空間モードマッチングを向上させることで、さらなる増幅向上が必要である。

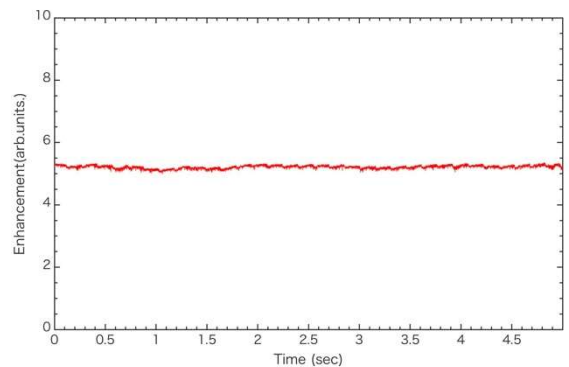


Figure 6 Enhancement by the cavity

3. SPOPO による LO 光安定生成

SPOPOとは非線形結晶で生成されたSPDC光を増幅させる発振器である[9]。Fig. 2のように結晶長3 mmのtype-0 PPLNを内包したSPOPOを構築した。昨年度もSPOPOの構築を行っており詳しくは2017年度annual reportを参照頂きたいが、変更点は共振器制御の方法である。入射光に20 MHzの変調信号を加え、SPOPOからの出力信号を変調信号と電氣的に混ぜ合わせ、これをエラー信号として共振器ロックを行った(Dither lock method)。その結果Fig. 7のような安定性を得ることができ、一時間程度の安定発振を達成した。発振スペクトルはFig. 8のようになり1570 nm中心で縮退発振を示した。

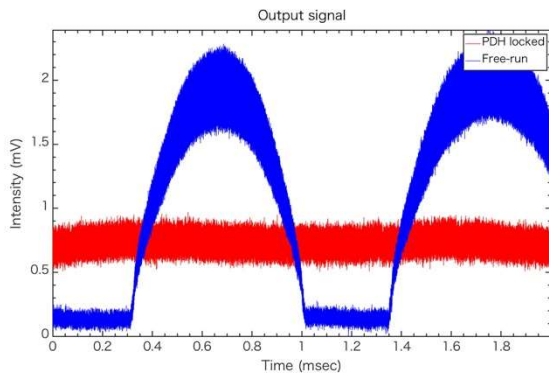


Figure 7 Waveform of SPOPO output

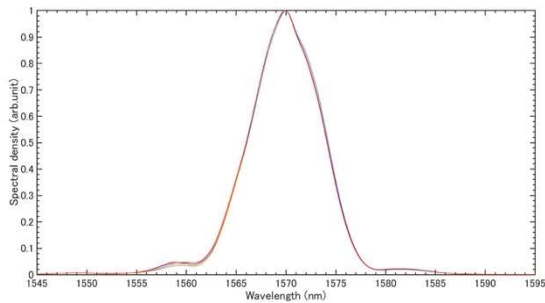


Figure 8 Spectrum of SPOPO output

4. まとめ

本研究では周波数多重量子光源生成に向けた、外部共振器による高強度 pump 光の生成と、SPOPO による 2 倍波長光源の生成を行なった。共に入射光に位相変調信号をかける sideband lock による共振器制御を行うことで高い安定性を達成した。

Appendix. 光源の繰り返し周波数安定性制御

パルスの繰り返し周期が不安定な時の制御方法を記す。Fig. 9 のように入射パルス間隔が不安定な光源を想定する。まず coarse stabilization 系は、N 番目のパルスと N+1 番目のパルスの干渉計である。重ね合わせ光の強度をモニタリングし、これが最大となるようにすることで、重ね合わせは $T + \Delta T$ 間隔となる。次に timing balancer 系において $\Delta T = 0$ となるように光路長を制御す

る。この 2 系においてパルス間隔制御が可能となる。結果は Fig. 10, 11 のようになり非制御時と比べ、制御時は高周波成分が軽減され繰り返し間隔の一定化に成功した。

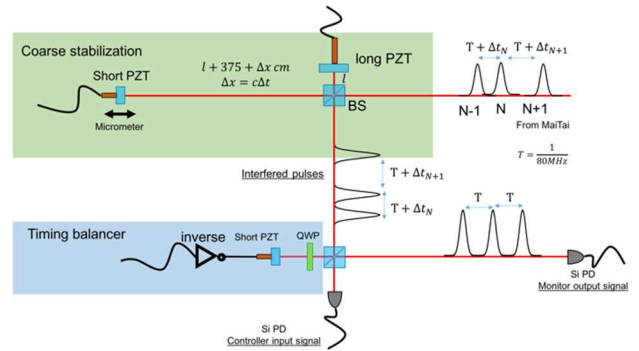


Figure 9 Jitter compensation of pulse interval

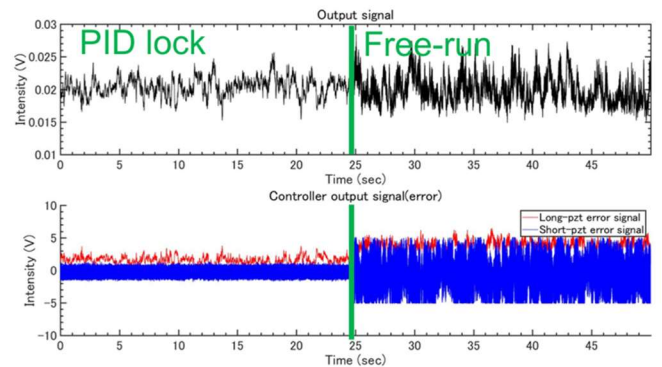


Figure 10 Waveform change by compensation

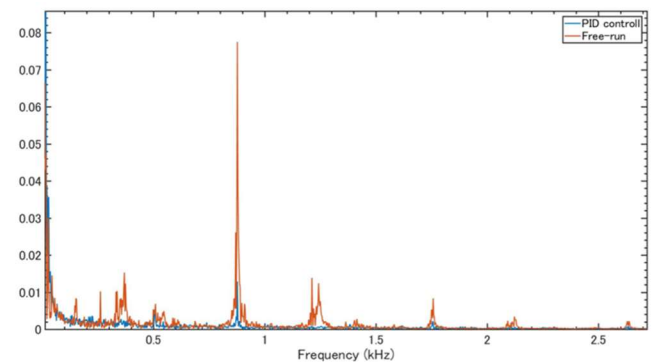


Figure 11 Spectrum change by compensation

Reference

[1] Ali-Khan, et. al., "Large-alphabet quantum key distribution using energy–time entangled bipartite states.", Phys. Rev. Lett. 98, 060503 (2007).

- [2] Lanyon, B. P. et al. Simplifying quantum logic using higher-dimensional Hilbert spaces. *Nat. Phys.* 5, 134–140 (2009).
- [3] Joonsuk Huh, et. al., “Boson sampling for molecular vibronic spectra”, *Nat. Photon.*, 9, 615-620(2015).
- [4] Yu He, et. al., “Time-Bin-Encoded Boson Sampling with a Single-Photon Device”, *Phys. Rev. Lett.*, 118, 190501(2017).
- [5] Jonathan Roslund, et.al., “Wavelength-multiplexed quantum networks with ultrafast frequency combs”, *Nat. Photon.*, 8, 109-112(2014).
- [6] Rui-Bo Jin, et. al., “Widely tunable single photon source with high purity at telecom wavelength”, *Opt. Express*, Vol. 21, 9, 10659-10666(2013).
- [7] Roland Krischek, et. al., “Ultraviolet enhancement cavity for ultrafast nonlinear optics and high-rate multiphoton entanglement experiments”, *Nat. Photon.*, 4, 170-173(2010).
- [8] J. C. Petersen and A. N. Luiten, “Short pulses in optical resonators”, *Opt. Express*, Vol. 11, 22, 2975-2981(2003).
- [9] Samuel T. Wong, et. al., “Self-phase-locked degenerate femtosecond optical parametric oscillator”, *Opt. Lett.*, Vol. 33, 16, 1896-1898(2008).