

Type-II 周期的分極反転ニオブ酸リチウム導波路結晶を用いた

多重周波数モード混合

Multiple frequency mode mixing using Type-II periodically poled LiNO₃ waveguide

山岸 佑多(M1), 保坂 有杜, 丹治 和史(B4)

Yuta Yamagishi, Aruto Hosaka, Kazufumi Tanji

Abstract

As an arbitrary mixing method of multimode quantum states prepared in the frequency domain, we employ a Type-II PPLN waveguide and measure the characteristics of sum frequency generation.

1. はじめに

近年、量子計算は古典計算手法において指数関数的に増加する計算のコストを大きく削減できるとされ研究されている。特に光子状態を利用した量子計算に注目すると Han-Sen Zhong らにより 100 モードの量子干渉実験[1]が行われ、その存在感は大きくなりつつある。光量子計算は空間域[2]におけるモードリソースを活用したものが多数報告されている。空間域における量子計算の実現は比較的容易である一方で、モード数が増加していくにつれて必要な素子が膨大に増え、複雑で大きく高コストな実験系となってしまうことが懸念される。これを解決すべく時間域[3]や周波数域のモードリソースを活用した手法も考えられる。周波数域を用いた光量子計算の実現に注目すると、周波数域に展開される多モードを任意の割合で混ぜ合わせるような素子の確立が必要不可欠であるという課題がある。

そこで我々は周波数多モードを任意の割合で混ぜ合わせる手法として Quantum Pulse Gate (QPG)[4]に注目した。この手法は入力パルスに含まれる複数周波数モードと波形成形し特定の周波数モードのみを含むゲートパルスを非線形結晶に入射し、和周

波発生させることでゲートパルスに含まれるモードのみが和周波として出力されるという手法である。この時、入力された際に区別可能であった周波数モードそれぞれの和周波モードがすべて一致することで区別不可能となり、周波数域におけるモード混合が光子数計測結果として取得できる。

これを理解するためには縦軸と横軸をそれぞれプローブ(Input pulse)の波長、和周波(Output pulse)の波長として得られる Joint Spectral Intensity (JSI)を考えると分かりやすい。Fig. 1 (a)に示すようにポンプ光(Gate pulse)のエネルギー保存則を満たす強度分布と和周波発生を行う非線形結晶の位相整合条件による強度分布を掛け合わせたものが JSI である。ここで Fig. 1(b)のように波形成形により周波数域においてマルチモード化されたポンプ光を縦方向の位相整合条件をもつ Type-II PPLN 結晶においてプローブ光と和周波発生させることにより、独立した複数モードが縦方向に並ぶようになる。これはプローブの波長軸(縦軸)に射影すると3モード存在している一方で、和周波の波長側(横軸)側に射影すると1モードのみが存在しているようになる。これが多重周波数のモード混合となる。

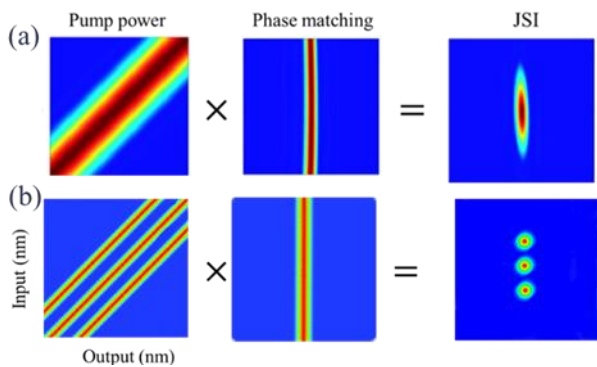


Fig. 1 Joint Spectral Intensity (a) without pulse shaping (b) with pulse shaping

2. 実験セットアップと実験結果

Type-II PPLN 導波路における JSI を測定する実験セットアップを Fig. 2 に示す。

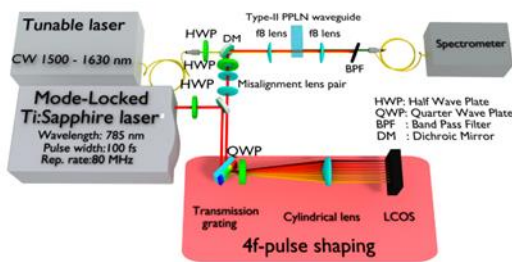


Fig. 2 Experimental setup for measuring JSI of sum frequency generation with type-II PPLN waveguide

Ti Sapphire pulse laser からのポンプ光(785 nm)は 4f 波形整形器を通過して成形されたのち、Type-II PPLN 導波路に入射される。一方、CW Tunable laser からのプローブ光 (1500~1630 nm)も同様に Type-II PPLN 導波路に同軸入射され、ポンプ光との和周波を発生させる。発生した和周波は分光器により波長ごとの強度が測定される。この測定を Tunable laser の波長を走査しながら行い、計測された和周波波長と強度の二次元データを結合していくことで、プローブ波長の軸を加えた 3 次元の JSI を計測することが可能になる。

2.1. 導波路パラメータの選択

導波路パラメータ変化による影響を JSI により確認した。Fig. 3 に導波路のパラメータ変化させた JSI を示す。Fig. 3(a)は導波路のリッジ幅を変化させたときの結果であり、リッジ幅が広がるにしたがって複数の縦長の強度分布が生じていることがわかる。これは導波路幅が広がることで、導波路内部を伝搬可能な伝搬モードが増加するためであると考えられる。それぞれの伝搬モードにより結晶内での実効屈折率が異なるため、位相整合条件が異なり複数の縦長の強度分布が生じている。QPG では単一モード伝搬である方が望ましいのでリッジ幅は 3 μm を採用することにした。また、Fig. 3(b)では結晶温度変化による位相整合のシフトを確認できる。我々の実験系ではプローブ光の中心波長が 1570 nm であることを想定しているため、それに合わせた温度調整を行った。

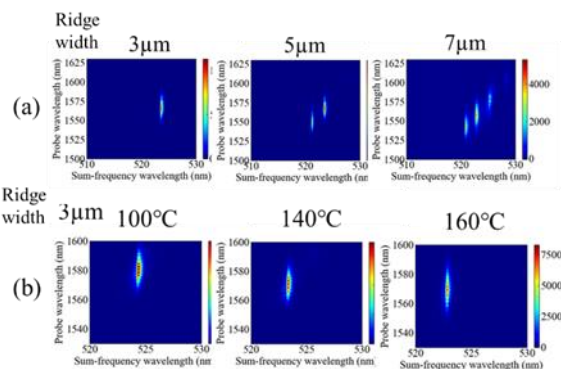


Fig. 3 (a) JSI changes due to ridge width (b) JSI changes due to temperature

次に導波路の結晶長変化による影響を示す。導波路構造では光閉じ込め効果により導波路長すべてにおいて非線形効果が生じる。これにより結晶長が長いと高い和周波変換効率を期待できる一方で、位相整合許容幅が狭くなる。Fig. 4 は結晶長 3.2 mm と 8.0 mm の JSI を比較したもので、横幅が狭くなっていることが確認できる。JSI が細長くなると位相整合条件のわずかな傾きや曲がりが見

著となり、和周波の単一モード結合性が低下する。そのトレードオフを考慮し結晶長を選択する必要がある。

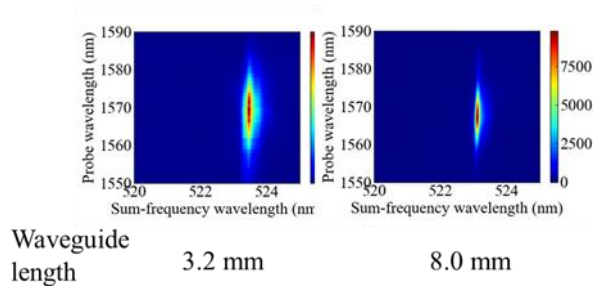


Fig. 4 Effect of waveguide length

2.2. 利用可能モード数の測定

周波数マルチモード化する際、1モードあたりの周波数幅を狭くするほど、限られた周波数帯域の中に多数のモードを用意することができる。しかし、QPG動作を考えると1モードあたりの周波数幅を狭くしすぎることによりモードの独立性の劣化が生じる。具体的には波形整形したポンプ光を狭くしすぎると位相整合許容幅との関係により1モードに注目した時のJSIが斜めになってしまいモードの独立性を表すシュミットナンバー[5]が劣化する。以上を考慮してモードの独立性を保った状態での最小のポンプ帯域幅から利用可能なモード数を見積もる。

リッジ幅 $3\ \mu\text{m}$ 、温度 130°C 、結晶長 $3.2\ \text{mm}$ 、分極反転周期 $3.6\ \mu\text{m}$ の Type-II PPLN 導波路におけるポンプ光帯域幅変化に対するシュミットナンバーの変化のグラフを Fig. 5 に示す。ポンプ帯域幅が狭くなるにつれてシュミットナンバーの計算結果が劣化していく様子が確認できる。

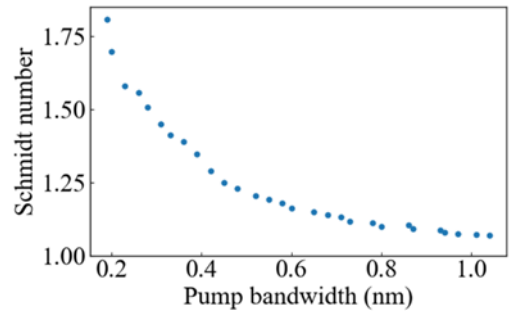


Fig. 5 Schmidt number for various pump laser bandwidths

今回の研究においてはシュミットナンバーが 1.1 以下でモードが独立しているとした。この条件を満たす最小のポンプ光の帯域幅 FWHM は $0.87\ \text{nm}$ であり、各モードの独立性を考慮してこれらを 1.1 倍した値を波形成形前のポンプ光の帯域幅 $6.15\ \text{nm}$ に敷き詰める。これにより利用可能な最大モード数は 6 モードと見積もることができる。

また、デモンストレーションとして実際にポンプ光を波形成形した時の JSI を取得した。Fig. 6 に示すように、左から波形整形を用いないとき、6 モードを敷き詰めた時、4 モード+強度変調を加えた時の JSI が得られている。

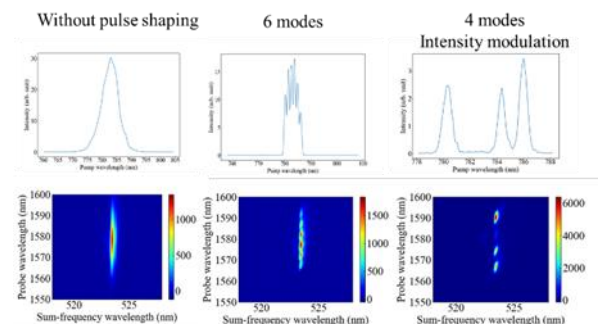


Fig. 6 JSI with pulse shaping

2.3. 和周波の変換効率

作成した QPG を量子光レベルの入力に対応させるためには最大効率での和周波発生が行われることを確認する必要がある。そこで 2.2 の実験と同じ

パラメータの Type-II PPLN 導波路の変換効率を測定した。理論的にはポンプ光の電場強度に対して \sin^2 の形で和周波の変換効率が変化する[6]。実際に測定したグラフが Fig. 7 である。ポンプ光のパワーを増加させるとそれに伴い和周波のパワーが増加するがあるポンプ光パワーから和周波パワーの上昇が止まる。この結果ポンプパワーが 16 mW において変換効率が最大に達していると考えられる。

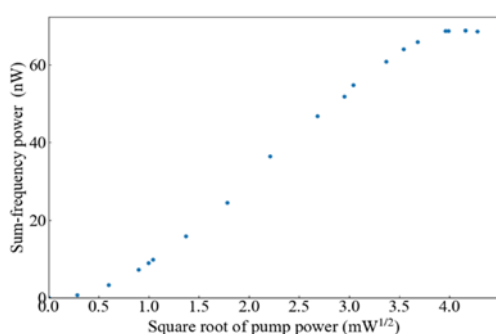


Fig. 7 Conversion efficiency

3. まとめ

本研究では多重周波数モード混合を Type-II PPLN 導波路を用いた QPG の実現に向けてその特性の測定を行った。導波路パラメータ変化による JSI 特性から実験に用いる導波路パラメータを選択した。また、選択した導波路における利用可能なモード数は最大 6 モードであり、16 mW のポンプ光入射で和周波変換ピークに達することを確認した。これらの実験結果は多重周波数モード混合に向けた QPG の導波路結晶選択の指針となる。

References

- [1] Han-Sen. Zhong, et al., "Quantum computational advantage using photons", *Science* 370, 1460 (2020).
- [2] Joonsuk Huh, et. al., "Boson sampling for molecular vibronic spectra", *Nat. Photon.* 9, 615 (2015).
- [3] Yu He, et. al., "Time-Bin-Encoded Boson Sampling with a Single-Photon Device", *Phys. Rev. Lett.* 118, 190501(2017).
- [4] Andreas Eckstein, et al., "A quantum pulse gate based on spectrally engineered sum frequency generation", *Opt. Express* 19,13770 (2011).
- [5] Rui-Bo Jin, et. al., "Widely tunable single photon source with high purity at telecom wavelength", *Opt. Express* 21, 10659 (2013).
- [6] Benjamin. Brecht, et al., "From quantum pulse gate to quantum pulse shaper—engineered frequency conversion in nonlinear optical waveguides", *New J. Phys.* 13, 065029(2011).