

# Type-II 周期的分極反転ニオブ酸リチウム結晶を用いた 多重周波数モード混合

Multiple frequency mode mixing using Type-II periodically poled LiNO<sub>3</sub>

山岸 佑多(B4), 保坂 有杜, 大見 聡仁(M2), 高橋 和輝(B4)

Yuta Yamagishi, Aruto Hosaka, Akihito Omi, Kazuki Takahashi

## Abstract

We demonstrate multiple frequency mode mixing using sum frequency generation with a type-II PPLN, which is applicable to quantum simulators. We measure the number of available modes and conversion efficiency.

## 1. はじめに

光の量子分野では、短期的に量子計算の古典計算に対する超越性を実証するために特定の計算のみ可能な量子シミュレータに焦点が当てられている。Arkhipovらにより提唱された Boson sampling もその一つであり、古典コンピュータでは計算に大きな時間的コストを必要とするユニタリー変換の行列演算を光量子回路により計算できることが示された [1]。さらに、光は調和振動子モデルとして扱えることから、分子の振動準位が調和振動子に近似できることに注目し、量子化学分野における分子の振動遷移を光量子回路を用いて計算する方法が提案されている [2,3]。振動遷移解析を光量子回路で実現するためには任意の次元軸において独立で多重な状態を用意する必要がある。例えば空間域[3]、時間域[4]、周波数域などが挙げられる。多くの実験では、実装が比較的容易な空間域を用いているが、空間域では利用するモード数に合わせて、量子状態の発生装置、光量子回路、測定装置が増えていくため広いスペースが必要になる。集積化するために、例えば光量子回路ではチップ導波路を使った手法も実証されている [5]。

時間モードや周波数モードを利用すると空間的に装置が広がることを避けることができる。周波数モードを利用しようとする場合、複数周

波数モードを混ぜ合わせる手法は確立していない。そのため周波数領域を利用した量子シミュレータの実現に向けては、実験的にその手法を実現することが必要となる。

我々のチームでは多重周波数モード混合を Type-II PPLN の特異な位相整合条件を用いた和周波発生により実現した。縦軸と横軸をそれぞれプローブ(Input)の波長、和周波(Output)の波長として得られる Joint Spectral Intensity (JSI) は Fig. 1(a)に示すようにポンプ光のエネルギー保存則による制限と和周波発生を行う非線形結晶の位相整合条件の掛け合わせにより得られる。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パルス化されたポンプ光を縦方向の位相整合条件をもつ結晶 Type-II PPLN 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 JSI 上に縦方向に並ぶようになる。これはプローブ光の周波数領域の複数モードを和周波の単一モードに結合できること、つまり多重周波数モードを混合できることを示している。

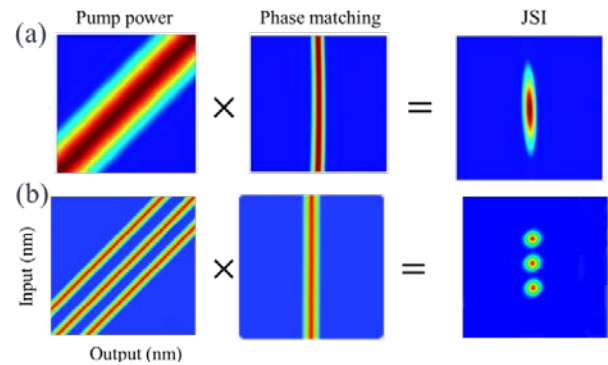


Fig. 1 Joint Spectral Intensity (a) without pulse shaping (b) with pulse shaping

## 2. 実験セットアップと実験結果

Type-II PPLN による和周波発生による JSI を測定する実験セットアップを Fig. 2 に示す。

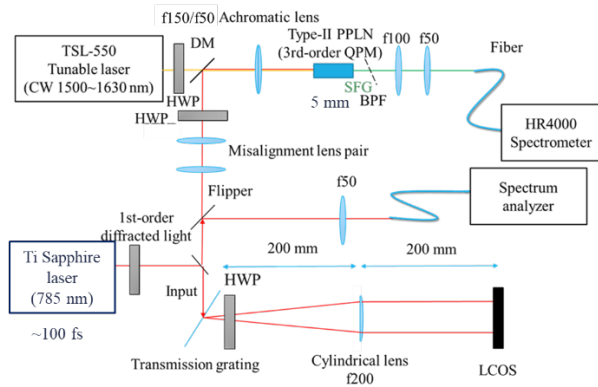


Fig. 2 Experimental setup for measuring JSI of sum frequency generation with type-II PPLN

Ti Sapphire laser からのポンプ光(785 nm)は 4f 波形成形器を通過して成形されたのち、5 mm の Type-II PPLN 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 に同軸入射され、ポンプ光との和周波を発生させる。ポンプ光光路に含まれるミスアライメントレンズペアはポンプ光とプローブ光の焦点位置が同じになるように調整するためにある。

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することで、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。

実際の測定で得られた JSI を Fig. 3 に示す。縦方向に長い JSI が得られていることから Type-II PPLN の位相整合条件が実験的に縦方向になっていることが確認できたといえる。

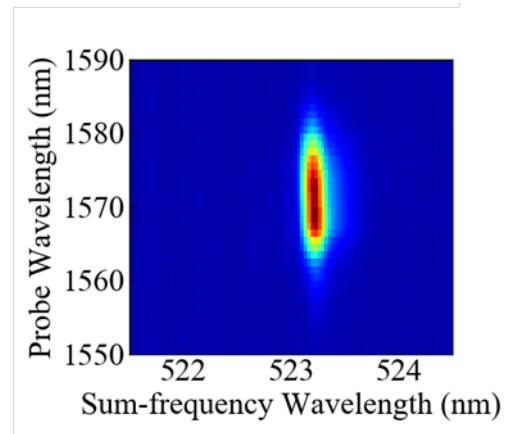


Fig. 3 JSI obtained from the experiment with Type-II PPLN

さらに Fig. 4(a)に示すような波形成形をポンプ光に行った時の JSI は Fig. 4(b)のようになった。図からわかるようにプローブ光の波長に対して独立している複数モードが単一の和周波の周波数に変換されていることが確認できる。

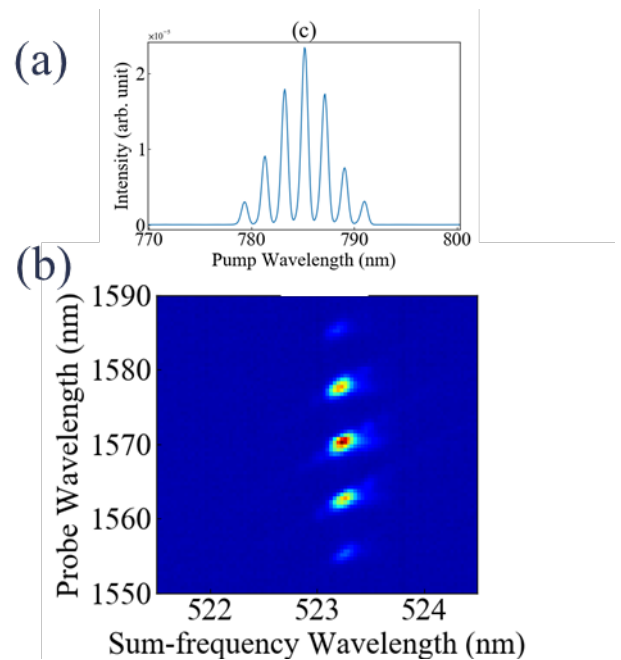


Fig. 4 (a) pulse shaped pump spectrum (b) JSI with pulse shaped pump

## 2.1. 利用可能モード数の測定

和周波による多重周波数モード混合において、利用可能なモード数は波形成形前のポンプ光の帯域幅に制限されてしまう。そのため波形成形によるパルス列の1パルスあたりの帯域幅を可能な限り狭めることが必要になるが、狭めすぎるとポンプ光の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[6]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。

ポンプ光の帯域幅を変化させたときのJSIからシュミット分解により求めたシュミットナンバーをまとめた図を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。またType-II PPLN前のレンズの焦点距離が短くなるとレイリー長が短くなり、実行結晶長が短くなるので、位相整合許容幅が広がるためf50のシュミットナンバーがf150よりも全体的に劣化している様子も確認できる。

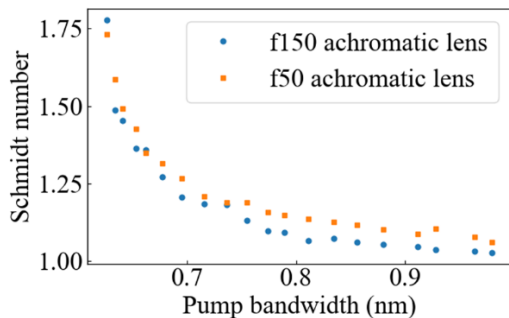


Fig. 5 Schmidt number for various pump laser bandwidths

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f150とf50でそれぞれ0.789 nmと0.912 nmであり、各モードの独立性を考慮してこれらを1.15倍した値を波形成形前のポンプ光の帯域幅6.56 nmに敷き詰める。これにより利用可能な最大モ

ード数はf150とf50でそれぞれ7モードと6モードと見積もることができた。

## 2.2. 和周波の変換効率

和周波発生による多重周波数モード混合を量子シミュレータに応用するためには光子数レベルの量子光においても効率よく和周波を生成できる必要がある。そこで今回使用した3次のType-II PPLNの変換効率を測定した。測定するにあたって、和周波が非常に弱いためプローブ光としてSPOPOを用いた1.57  $\mu\text{m}$ のパルスを用い、さらにType-II PPLN前のレンズはf50を用いた。ポンプ光の平方根に対する和周波のパワーをプロットしたものをFig. 6に示す。

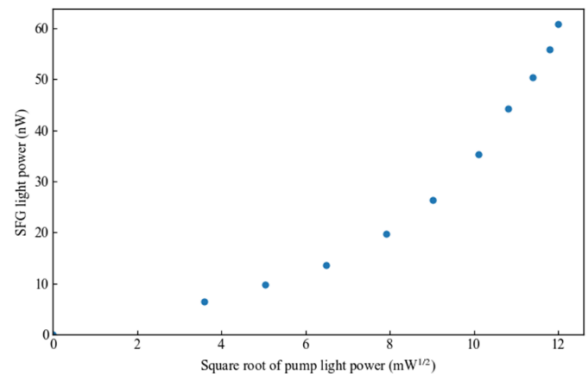


Fig. 6 Conversion efficiency with type-II 3rd-order PPLN

測定の結果、我々の実験セットアップでの最大のポンプパワーにおいて、1.57  $\mu\text{m}$ のプローブ光のパワー62.4  $\mu\text{W}$ に対し、523.3 nmの和周波のパワーが60.8 nWと計測され、変換効率が最大0.033%という結果になった。この結果から光子数レベルの量子光がほとんど和周波に変換されないため、光子数計測は難しいということがいえる。これはPPLN作成の技術的な障害からPPLNが3次の分極反転となっていることに起因していると考えられる。

### 3. まとめ

本研究では多重周波数モード混合を Type-II PPLN を用いた和周波発生により実現することを行った。測定の結果利用可能なモード数は最大 7 モードであることがわかった一方で、和周波の変換効率は 0.033% であることが判明した。変換効率が著しく低いことから、光子数レベルの量子光への応用は難しいという結論となった。今後は変換効率を向上させるために 1 次の導波路 Type-II PPLN を用いた測定を行い、量子光を用いたモード混合を実証する。

### Reference

- [1] Aaronson, S. & Arkhipov, A. in Proceedings of the 43rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing (eds Fortnow, L. & Vadhan, S.) 333–342 (ACM, 2011).
- [2] Chris Sparrow, *et. al.*, “Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics”, *Nature* **557**, 660-667(2018).
- [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] Hui Wang, *et. al.*, “High-efficiency multiphoton boson sampling”, *Nat. Photon.*, **11**, 361-365(2017).
- [6] Rui-Bo Jin, *et. al.*, “Widely tunable single photon source with high purity at telecom wavelength”, *Opt. Express* **21**(9), 10659-10666(2013).