

## 光保存のための直交偏光光子対光源の構築

## Construction of orthogonally polarized photon pair source for light storage

○上菌慎悟<sup>1</sup>, 桑本剛<sup>2</sup>\*Shingo Uesono<sup>1</sup>, Takeshi Kuwamoto<sup>2</sup>

Abstract: We have a plan to store polarization entangled photon pair in neutral atoms. In this work, we developed a cavity resonator for increasing the power of 397.5-nm-wavelength laser (pump laser) used for generating the orthogonally polarized photon pairs, which are source of the polarization entangled photon pairs. The generation rate of orthogonally polarized photon pairs was  $1800 \text{ s}^{-1}$  and the visibility of two-photon interference of the photon pairs was 93% at the pump-laser power of 6 mW.

## 1. はじめに

我々は、偏光量子もつれ光子対の<sup>87</sup>Rb原子中への保存を目指している。偏光量子もつれ光子対は2つの光子が時間的、空間的、スペクトル的に見分けがつかない状態にあり、この状態にある光子対はたとえどんなに離れていたとしても相関を持ち、一方の光子の状態を観測することで、もう一方の光子の状態が決定される。この性質を利用することによって偏光量子もつれ光子対は量子テレポーテーションや量子鍵配送等に利用され、量子情報通信において不可欠である[1]。

本研究では、<sup>87</sup>RbのD1線の遷移波長に等しい、波長795 nmの直交偏光光子対(上述の偏光量子もつれ光子対の元となる光子対)を、周期分極反転構造を持ったチタン酸リン酸カリウム (PPKTP) 結晶を使って自然パラメトリック下方変換(SPDC)を行うことにより生成し、その量子性をみるため2光子干渉実験を行った、その時のビジビリティは93%であった。これは発生した直交偏光光子対が十分な量子性を持っていることを意味する。

## 2. 蝶ネクタイ型共振器による第2高調波発生[2]

まず、直交偏光光子対の発生に用いる波長397.5 nmの光の発生について述べる。発生には非線形光学結晶を用いる。強誘電体などの自発性分極を有する結晶に、レーザーなどの強い光電界を入射した場合、光電界による分極振動に歪みが生じて高次の非線形光学効果が現れる。二次の非線形光学効果を表わす電気感受率 $\chi(2)$ が大きい材料を用いると、第二高調波発生(SHG)やSPDCなどの光波長変換を行うことができる、波長変換前後でエネルギー保存則と運動量保存則が満たされる事が必要であり、これは位相整合条件と呼ばれる。

本研究ではあらかじめ<sup>87</sup>RbのD1線(遷移波長795 nm)

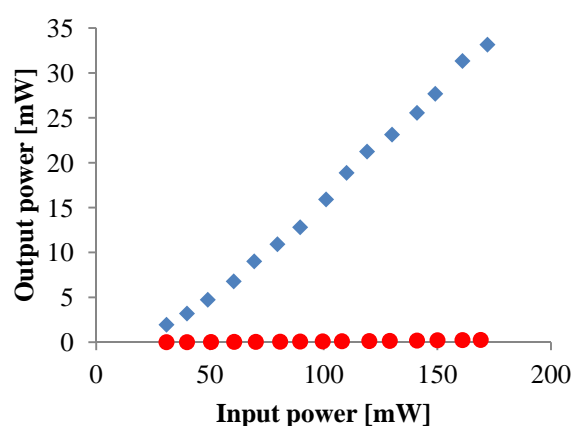


Figure 1. 397.5-nm-wavelength SH-light output as a function of 795-nm-wavelength SHG-pump-laser power. Red circles and blue squares correspond to the SHG with and without the cavity, respectively.

に波長をロックしたレーザー光(SHGポンプレーザー)を非線形結晶の一種である Type I PPKTP(周期分極反転 KTiOPO4: Periodically Poled Potassium Titanyl Phosphate, 高さ1 mm, 幅2mm, 長さ10mm)に入射し、SHGにより波長397.5 nmのレーザー光(SH光)を得る。

SHGポンプレーザーが一度だけ結晶を通過するだけでは、SH光の発生効率が悪く、十分なパワーが得られないため、蝶ネクタイ型共振器内に結晶を配置することによって、SH光の発生効率を上げた。共振器内で光は増幅され、結晶に入射する実質的なSHGポンプレーザー強度が増大する。その結果、SH光のパワーが増える。

図1に共振器を使用している場合と使用していない場合のSHGポンプレーザーのパワーに対する発生したSH光のパワーを記す。SHGポンプレーザーのパワーが100 mWの時、SH光の出力は、共振器無しで100 μW、共振器ありで16 mWであった。共振器を導入することで、SH

光パワーの大幅な増幅が実現できた。

### 3. 直交偏光光子対の生成

直交偏光光子対の生成について説明する。発生には Type-II PPKTP 結晶を用いた SPDC を行う。SPDC は SHG の逆過程で、波長 397.5 nm の光を 795 nm に変換する非線形光学過程である。SPDC により生成される 2 光子は必ず同時に発生し、Type-II 結晶を用いた場合は互いに偏光が直交している。

発生した光子対にはいくつか注意点がある。まず PPKTP 結晶には複屈折があるため、垂直偏光の光子と水平偏光の光子の結晶内を進む速度が異なる。よって光子対が結晶から出てきたとき、それらは時間的、空間的に見分けがつかず、光子対の量子性が失われてしまう。それを防ぐため、PPKTP 結晶後に光子対の位置補正を行う結晶を置いた。この補正結晶は PPKTP と同じ複屈折率を持つ長さ PPKTP 結晶の半分の KTP 結晶(高さ 2 mm,幅 2 mm,長さ 5 mm)であり、PPKTP 結晶の光学軸に対して 90° 傾けて置く。

発生した光子対の周波数は大きな広がりを持っている。原子に保存するためにはこの周波数の広がりを狭窄化しなければならない。本実験では 20 nm の帯域幅を持つバンドパスフィルターを 1 枚と、0.5 nm の帯域幅バンドパスフィルターを 3 枚用いた。

### 4. 二光子干渉測定[3]

生成した直交偏光光子対の量子性を調べるために二光子干渉測定を行った。この測定は比較的容易に光子対の量子性を確かめることができる。発生した光子を先ず  $\lambda/2$  板に通し、偏光を調整する。その後偏光ビームスプリッター(PBS)に通す。PBS は水平偏光を透過し、垂直偏光を反射する光学素子である。偏光が 45° または 135° の光子の場合、1/2 の確率で水平偏光、垂直偏光に射影し、それぞれ透過、反射する。直交偏光光子対の場合は、それぞれの光子が 0°、90° の時、1つは透過し、他は反射するので、それぞれの経路に 1 つずつ光子が現れる。45° 及び 135° の場合、先に述べたとおり、1/2 の確率で反射、透過するため、それぞれの経路に光子が 1 つずつ現れる確率は 0°、90° の時の 1/2 になる。しかし、この 2 つの光子に量子性がある(見分けがつかない)場合、PBS 上で 2 つの光子が干渉し、それぞれの経路に光子が 1 つずつ現れる場合がなくなる。つまり、2 つの経路の同時計数を行ったとき、45° 及び 135° の時の同時計数が 0° 及び 90° の時に比べて半分以下になった場合、その光子対は量子

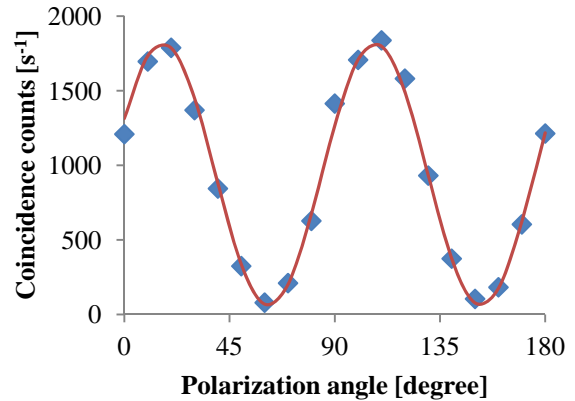


Figure 2. Result of tow-photon quantum interference.

性を持つとわかる。

図 2 に実験結果を示す。この時の光子対数は 1800 s<sup>-1</sup> であった(波長 397.5 nm のポンプ光パワーは 6.0 mW)。45° 及び 135° の時の光子数は 0°、90° の時の光子数に比べ、明らかに半分以下に落ちていることが分かる。この結果をビジビリティの公式、

$$V = \frac{\text{Count}(0^\circ \& 90^\circ) - \text{Count}(45^\circ \& 135^\circ)}{\text{Count}(0^\circ \& 90^\circ) + \text{Count}(45^\circ \& 135^\circ)} \quad (1)$$

にあてはめると、93%であった。これはこの光子対が十分な量子性を示している。

### 5. まとめ

今回、共振器を組むことによって、高効率な SHG を実現し SPDC のポンプ光として用いる波長 397.5 nm の光源を増強することができた。また、発生した直交偏光光子対に補正結晶、フィルター、アイリスを用いることにより、93%のビジビリティを得ることができた。

しかし 0.5 nm のバンドパスフィルターでは計算上、約 474 MHz の周波数広がりがあるため、今後、エタロンでこれを数 100MHz まで狭窄化したうえで、光子の原子への保存を試みる。

### 参考文献

- [1] C. Bennett *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 1895 (1993).
- [2] 赤松 大輔, 学位論文, 東京工業大学
- [3] C. E. Kuklewicz, *et al.*, Phys. Rev. A. **69**, 013807 (2004).