

PPLN を用いた非縮退偏光量子もつれ光子対の生成

鈴木 寛史^A、長能 重博^A、東海林 篤^A、清水 亮介^B、水津 光司^C、枝松圭一^A
^A東北大学電気通信研究所、^BJST さきがけ、^C名古屋大学大学院工学研究科

Generate of non-degenerate polarization-entangled photon pairs using PPLN

*Hirofumi Suzuki^A, Shigehiro Nagano^A, Atsushi Syouji^A,
Ryosuke Shimizu^B, Koji Suizu^C, Keiichi Edamatsu^A*

^AResearch Institute of Electrical Communication, Tohoku University,

^BPRESTO-JST,^CGraduate School of Engineering Nagoya University

Abstract

We have designed and fabricated periodically-poled LiNbO₃(PPLN) device for generating polarization entangled photon pairs of different wavelengths under Type-II phase matching condition, operating at 1510nm and 1590nm. We have investigated the polarization correlation of generated photon pairs.

はじめに

非線形結晶による自発パラメトリック下方変換(SPDC)で生成した光子対は量子テレポーテーション^[1]や量子暗号^[2]など、量子情報分野における様々な原理検証実験の量子もつれ光子対光源として使用されてきた。

SPDC を用いて量子もつれ光子対を生成するデバイスとして近年注目を浴びているものに、疑似位相整合(QPM)を利用した周期分極反転 LiNbO₃(PPLN)がある^[3]。PPLN を用いると、分極反転周期に応じた任意の波長で位相整合をとることができるほか、結晶軸に沿った 90 度位相整合を満たすことができるため良質な空間モードの光子対を生成することが可能であるなど、量子もつれ光源のための新しい材料として注目されている。

PPLN によって生成した偏光量子もつれ光子対の検出方法として、無偏光ビームスプリッターを用いる方法^[4]や準同軸方向に光子を出射することで光路を分けて検出する方法^[5]などが報告されているが、これらの方法は生成された光子対の 1/2 しか利用することがで

きないことや光学系が複雑になるという欠点があった。

本研究では、より高効率でかつ簡便に偏光量子もつれ光子対を検出できる方法として、波長の異なる偏光量子もつれ(非縮退偏光量子もつれ)光子対を生成し検出する方法を提案する。偏光量子もつれ状態を形成した光子対の波長が互いに異なる場合、ダイクロイックミラーを使うことにより、同軸上に生成した光子対を原理的に 100%の確率で分離・検出することができる。

今回は type-II の位相整合条件を利用し、1510nm 付近と 1590nm 付近に非縮退偏光量子もつれ光子対が生成されるように設計した 2 種類の分極反転周期を持つ PPLN 結晶を製作し、その偏光相関測定を行った結果について報告する。

PPLN 結晶の作製

擬似位相整合とは非線形結晶の自発分極を周期 Λ で反転させることによって、位相整合条件からのずれ Δk を逆格子ベクトル $2\pi/\Lambda$ によって補償する技術である。図 1 の上図に結晶温度 120°C において波長 775nm のポンプ光を入射した場合に SPDC によって生成される光の波長と結晶の分極反転周期の関係を示す。図 1 から分かるように、波長 775nm のポンプ光を縮退した波長(1550nm)の光に変換するために必要な分極反転周期は、type-II 位相整合条件の PPLN 結晶の場合、約 $9.37\mu\text{m}$ である。この反転周期を少しずらすと波長の異なる o-ray、e-ray が生成される。反転周期が $9.25\mu\text{m}$ と $9.5\mu\text{m}$ の時に 1510nm 付近と 1590nm 付近の互いに偏光の異なるシグナル光とアイドラー光が生成されることから、 $9.25\mu\text{m}$ と $9.5\mu\text{m}$ の分極反転周期を合わせ持つ PPLN を用いることで非縮退した偏光量子もつれ光子対を生成できる。

分極反転の方法は電界印加法、プロトン交換法、電子線照射法などがあるが、再現性がよく深い分極反転構造を作製できる電界印加法を採用した。Z-cut、 0.5mm 厚の LiNbO_3 結晶をフォトリソグラフィーによって+Z 面上に周期的な電極構造を形成、高電圧を印加することによって 40mm 長の周期分極反転構造を作製した。図 2 に光学顕微鏡で観察した作製した PPLN の

実験

作製した PPLN 結晶が持つ位相整合条件の特性を評価するために、PPLN の温度を調整することで屈折率を変化させ、その際のパラメトリック蛍光スペクトルの変化を CCD 付分光器で測定した。ポンプ光として、Eb ドー

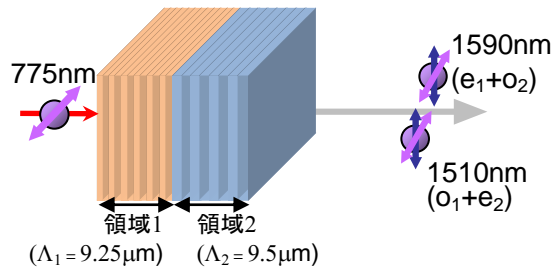
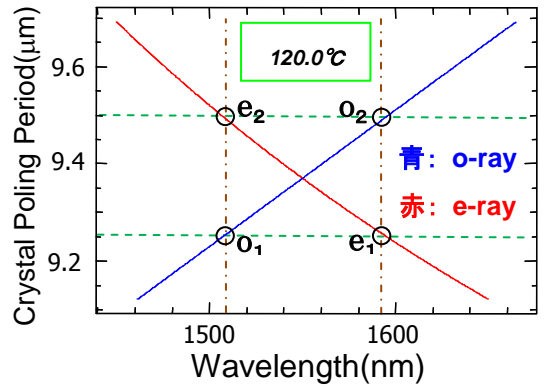


図 1 上図: o-ray、e-ray の波長と結晶の反転周期の関係
下図: 反転周期 $9.25 \cdot 9.5\mu\text{m}$ のときの簡略図

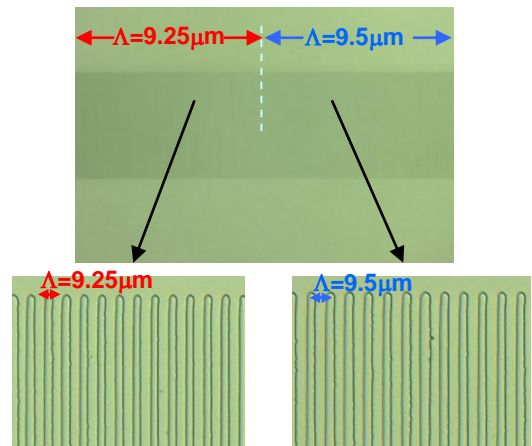


図 2 反転分極領域のエッジング後の顕微鏡写真(上図が全体図、下図が拡大図)

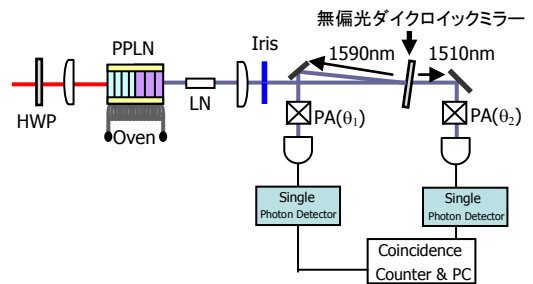


図 3 偏光相関測定図

プファイバ増幅器を用いた平均出力 10mW、1550nm 帯パルスレーザ(パルス幅 2.5ns、繰り返し周波数 4MHz)の第 2 次高調波を使用している。

また、生成された光子対が偏光量子もつれ状態を形成していることを確認するために、偏光相関測定を行った。図 3 に偏光相関測定の測定系を示す。生成された光子対をダイクロイックミラーで分離し、各々の光子を InGaAs / InP-APD で検出した。このとき片方の光路の偏光角を半波長板(HWP)と偏光ビームスプリッター(PBS)で 0° 、 45° 、 -45° 、 90° に固定し、もう片方の光路の偏光を順次変化させた場合の同時計数の変化を測定した。

実験結果と考察

図 4-1 にパラメトリック蛍光スペクトルの温度依存性を示す。結晶温度 110°C の場合、それぞれの分極反転領域から o-ray、e-ray が出射され 4 つのピークが見えているが、温度を 120°C にあげると、それぞれの領域から発生する o-ray、e-ray が重なっており、さらに温度を上げて 135°C になると、またピークがずれて離れていくことが分かる。図 4-2 の点は、パラメトリック蛍光の各ピーク波長を PPLN 結晶の温度に対してプロットしたものである。また、実線は位相整合条件から計算された値である。これより、計算値と測定されたピークの波長は良く一致しており、設計通りに周期分極反転が出来ていることがわかる。

次に偏光相関測定の結果について述べる。図 5-1 に片方の光路の偏光角(θ_1)が 0° および 90° に固定し、もう片方の光路の偏光角(θ_2)を変化させた時の同時計数の変化を示す。また、図 5-2 は θ_1 を 45° 、 -45° に固定した場合

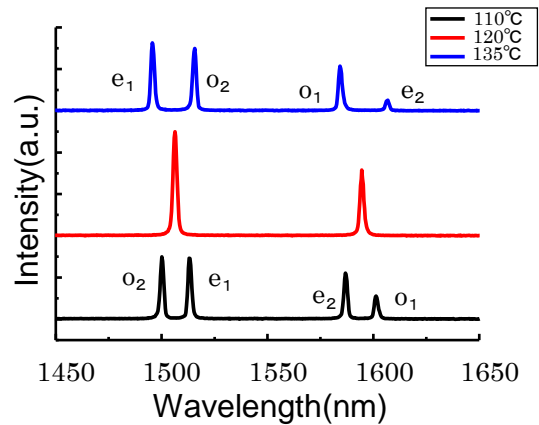


図 4-1 スペクトルの温度依存性

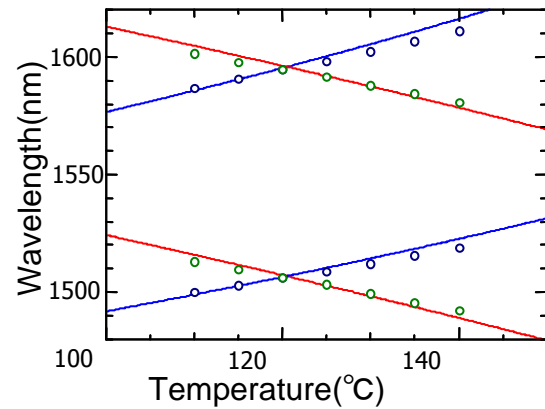


図 4-2 結晶温度に対するピーク波長

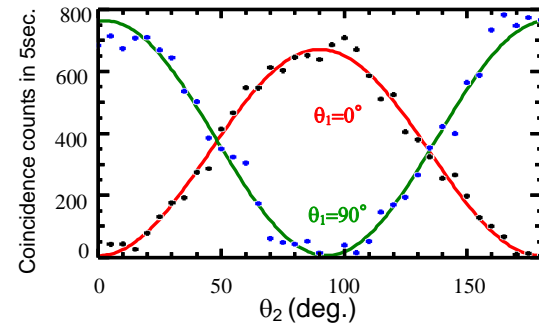


図 5-1 偏光相関測定結果(0° / 90°)

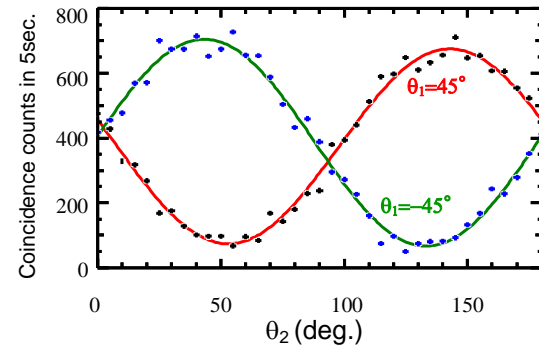


図 5-2 偏光相関測定結果(45° / -45°)

の同時計数の変化である。図 5-1 は光子対の片方の光子の偏光を水平偏光、または垂直偏光に射影したものであるが明瞭度(Visibility)が高いことがわかる。これは、結晶のそれぞれの領域から発生する光子対が水平偏光と垂直偏光であること、すなわち Type-II 位相整合条件によって発生した光子対を観測していることを考慮に入れると自明な結果である。これに対し、図 5-2 は片方を±45° 偏光で射影したもので、Type-II 位相整合による古典的な偏光相関では説明することのできず、光子対が偏光に関する量子もつれを有することを示唆している。図 5-1 および図 5-2 同時計数率 N は

$$N \propto \sin^2(\theta_1 + \theta_2)$$

の形の変化を示しており、このことから発生した光子対が $|HV\rangle + |VH\rangle$ という三重項状態を形成しているかどうかができる。また、図 5-2 の Visibility は 88% であり古典的偏光相関を仮定した際の上限值である 71% を超えていることから、発生した光子対が三重項状態の量子もつれ状態を形成しているということを確認することができた。なお、Visibility が 100% に達しない原因としては、結晶の分極反転にむらがあったこと、補償器(compensator)の厚さがビーム系に比べてやや薄かったことなどが考えられる。

まとめと今後の展望

今回我々は 2 種類の反転分極周期周期を合わせ持つ擬似位相整合 LiNbO_3 を作製し、これを用いて非縮退偏光量子もつれ光子対を生成について研究した。偏光相関測定の結果から発生した光子対が偏光量子もつれ光子対を形成していることが分かった。

今後、試料作成方法の改良によって、より均一性の高い PPLN を作製することや、より適切な補償器を導入することでさらに高効率かつ高い程度の量子もつれ光子対を生成することを目指す予定である。

参考文献

- [1] D. Bouwmeester et al., Nature 390, 575 (1997)
- [2] T. Jennewin et al., Phys. Rev. Lett. 84, 4729 (2000)
- [3] Mark C. Booth, Phys. Rev. A. 66, 023815 (2002)
- [4] C. E. Kuklewicz, et al., Phys. Rev. A. 69, 013807 (2004)
- [5] 杉浦ら, 2006 年秋季物理学会学術講演会, 21p-XK-7