制御された周波数量子もつれ光子の生成

清水 亮介 a) 枝松 圭一 b)

a) 科学技術振興機構 さきがけ

b) 東北大学 電気通信研究所

Generation of photon pairs with controlled frequency entanglement

Ryosuke SHIMIZU^{a)} and Keiichi EDAMATSU^{b)}

a) PRESTO, Japan Science and Technology Agency

b) Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

Abstract

We report the high-flux and broadband generation of photon pairs with controlled frequency entanglement. For the generation of the entangled state consisting of frequency-anticorrelated photons, we use PPMgSLT pumped by a continuous-wave (cw) laser. The state consisting of frequency-correlated photons is produced from PPKTP under the extended phase-matching condition. Observing two-photon spectra, we confirmed that frequency-entangled states were generated.

<u>はじめに</u>

自発パラメトリック下方変換過程を経て放出 されるシグナル光子とアイドラー光子の対(パ ラメトリック光子対)は、周波数や波数ベクトル, 時間や偏光といった物理的自由度において強 い量子相関を示す。そのため、「量子もつれ」 といった量子力学の基礎的概念や、それらを 積極的に利用した量子情報処理技術の検証 実験においてしばしば利用される。

光子の持つ物理的自由度のうち、偏光は理 想的な2準位系を用意でき、波長板や偏光子 等を用いることで、容易に状態の操作や検出 が可能であることから「量子ビット」を用いる量 子情報処理技術の原理検証実験に最適な物 理系を提供する。そのため、偏光を用いた数 多くの実験が報告されている。 しかし、光子には周波数や波数ベクトルといった連続変数の物理量においても量子もつれ 状態を生成することが可能で、これらの物理的 自由度における量子もつれ状態は、量子情報 処理技術だけにとどまらない応用の可能性が 見いだされている。特に、周波数自由度の量 子もつれ(以後、「周波数量子もつれ」と呼ぶ) は量子もつれ光子の時間領域の振る舞いに 大きく影響する。

従来の古典的光パルスを用いた光計測技術 では、光パルス形状だけでなく、パルス内部の 電界を直接操作することが可能になり、光の古 典的波動としての性質をほぼ完全に制御し、 計測を行うことが出来つつある。しかし、光の 量子性に起因した自由度の制御はほとんどな されていない。そのため、周波数量子もつれ 状態を制御し、上手く利用することできれば、 光計測技術のさらなる発展が期待できる。

そこで、我々は時間-周波数領域の光計測 における「量子もつれ」の役割を明らかにする ことを目的とし、周波数量子もつれを制御した 光源の開発を行っている。今回は周波数量子 もつれ光源の制御方法と作製した光源の特徴 について報告する[1]。

周波数量子もつれ状態

以下に、今回着目する周波数量子もつれ状 態について簡単に説明する。まず、角周波数 ω。を中心に対称なスペクトル分布を持つ光パ ルスを想定し、さらに光パルス中には二つの光 子のみを含む二光子状態を考える。この際、 特徴的な二つの状態を考えることが出来る。 第一に、二光子がω。を中心に対称に分布する 状態(図1(a))。このような二光子状態は周波 数反相関状態と呼ばれる。次に考えられるの は、二光子が同一周波数上に存在する状態 である(図2(b))。このような二光子状態は周波 数相関状態と呼ばれる。これらの二光子の周 波数分布を二つの光子の角周波数の関数とし て表すと図1(b)および図2(b)のように±45°方向 に傾いた楕円形の分布として表される。ここで は、二光子の周波数分布を表すスペクトルを 二光子スペクトルと呼ぶ。二光子スペクトルの 長軸方向の分布は通常の(古典的な意味での) スペクトル分布を表し、短軸方向の分布は二 光子間の周波数相関の強さを表す。





これら二つの状態は二次のコヒーレンス関数 によって説明される二光子検出によってのみ 識別可能であり、一次のコヒーレンス関数によ って説明される従来の分光計測では識別不可 能である。つまり、これら二種類の光源の性質 の違いは古典的波動光学では説明できない。 そこで、このような特徴を持つ二種類の光源を 光計測へ適用し、光学応答に違いが現れれ ば、その光学応答の違いは光の非古典的性 質である周波数量子もつれの性質の違いに由 来する。これにより、光計測における周波数量 子もつれの役割を実験的に明らかにすること が期待できる。

周波数量子もつれ状態の制御方法

自発パラメトリック下方変換過程では一
つのポンプ光(角周波数*a*_p、波数ベクトル
*k*_p)の入射に対し、位相整合条件

$$\omega_{\rm p} = \omega_{\rm s} + \omega_{\rm i} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{k}_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{k}_{\mathrm{s}} + \boldsymbol{k}_{\mathrm{i}} \tag{2}$$

を満たすようにシグナル光子(角周波数*a*,,、 波数ベクトル *k*,) とアイドラー光子(角周 波数*a*,、波数ベクトル*k*)の対が発生する。 そのため、周波数反相関状態を伴った量子も つれ光子は、二光子状態を構成する二つの光 子の周波数和が一定になるように発生させれ ば良い。そのため、CW レーザーをポンプ光と して用いることで、容易に生成することができる。 しかし、我々は光計測技術への展開を目的と しているため、光源の開発に当たっては、以下 の三点を考慮した。①量子もつれ光子の操作 を容易にするためtype-IIの位相整合条件を利 用すること、②量子もつれ光子の生成効率を 向上させるために素子長をできるだけ長くする こと、③光計測における周波数量子もつれの 役割を明らかにするために広帯域なスペクトル を伴った量子もつれ光子を発生させること。従 来の非線形光学素子では、三つの条件を同 時に満たすことは困難であるが、周期分極反 転が可能かつ複屈折性の弱い LiTaO₃結晶で は全ての条件を満たすことができる。そこで、 我々は PPMgSLT (Periodically Poled MgOdoped Stoichiometric LiTaO₃)素子を採用し、 その評価を行った。

一方で、周波数相関状態の生成には拡張 位相整合条件を利用した[2]。拡張位相整合 条件では通常の位相整合条件に加え、以下 の群速度の整合条件が含まれる。

 $k'_{\rm p}(\omega_{\rm p}) = \{k'_{\rm s}(\omega_{\rm s}/2) + k'_{\rm i}(\omega_{\rm l}/2)\}/2$ (3) ここで、 k'_j (j = p, s, i)は各光子の群速度の逆 数(k'i=dki/døi)を表す。(1)、(2)、(3)式を同 時に満たし、超短パルスレーザーにより励 起することで周波数相関状態の生成が可能 になる。一般に、超短パルス光をポンプ光源と して量子もつれ光子対を生成する場合、ポン プ光、シグナル光、アイドラー光間の群速度不 整合による影響を回避するために、二光子生 成に用いる非線形光学結晶の結晶長や、シグ ナル光、アイドラー光の波長帯域を制限する 必要があった。一方で、拡張位相整合条件で は、ポンプ光、シグナル光、アイドラー光の間 の群速度の整合を考慮しているため、結晶長 や波長帯域の制限を緩和することも出来る。

KTP 結晶では type-II の位相整合条件のも とで、ポンプ光波長 792nm、シグナル光、アイ ドラー光波長 1584nm において群速度整合条 件を満たす。そこで、群速度整合条件を満た す波長において位相整合条件を同時に満足 させるために、分極反転周期 46.1µm を持つ PPKTP 素子を使用した。また、我々はフェムト 秒 Ti:sapphire レーザーをポンプ光源とし,過 去に報告されている結晶長(10mm)よりもさらに 長い結晶長(30mm)を持つ群速度整合 PPKTP (Periodically Poled KTiOPO₄)素子による量子 もつれ光子対の生成実験を行った。

周波数量子もつれ光子生成実験

実験系の概念図を図2に示す。前述したよう に、周波数反相関状態の生成には 40mm 長 の PPMgSLT 素子を利用した。この際、ポンプ 光源として波長 792.0nm の CW レーザーを用 いた。一方で、周波数反相関状態の生成には 30mm 長の PPKTP 素子を利用した。この際の ポンプ光源として中心波長 792nm、パルス時 間幅 120fs、繰り返し周波数 90MHz で動作す る Ti:sapphire レーザーを用いた。また、両素 子とも、温度はオーブンにより制御した。以上 の実験条件を用いることにより、1584nm を中 心としたスペクトル分布を持つ周波数量子もつ れ光子をポンプ光と同軸方向に発生させた。 意図した周波数相関を持つ量子もつれ光子が 生成されていること確認するために、以下の手 順で二光子スペクトルの測定を行った。生成し た量子もつれ光子対は type-II の位相整合条 件を使って発生させているため、二つの光子 の偏光は直交している。そこで、偏光ビームス



プリッター(PBS)によって二光子を個々の光子 に分割し、シングルモードファイバー(SMF)へ 結合する。その後、各々の光子を光ファイバー 結合型の中心波長可変(1560nm~1620nm)の バンドパスフィルター(TBF、透過帯域幅 0.5nm)へ導く。ここで、二つのフィルターを走 査しながら TBF を透過した二光子を二つのア バランシェフォトダイオード(APD)と時間相関 測定装置(Time-interval Analyzer)による同時 計数測定により検出し、二光子スペクトルを測 定した。図4に測定結果を示す。一般に、CW レーザーをポンプ光として type-II 位相整合条 件を利用して光子対を生成すると、相互作用 長が長くなるにつれ、スペクトル分布は狭帯域 化する。しかし、前述したように、複屈折性の 弱い LiTaO₃結晶では 40mm 長の結晶を使用



しているにも関わらず、広帯域スペクトル (Δλ~30nm)を伴った、負の周波数相関を 持つスペクトルを生成可能なことが実験的 に初めて観測された(図4(a))。また、図4 (b)は PPKTP 素子より発生した光子対の二 光子スペクトルであり、正の周波数相関を 伴った二光子が生成されていることを直接

的に示した初めての実験結果である。

以上の実験により、波長 1584nm 付近で周 波数量子もつれを制御した光源の作製に成功 したことが確認できた。この光源はバルク型の type-II 位相整合による量子もつれ光源として は世界最高レベルの二光子生成レート (~60000 pairs/mW/sec.)を持つことや、生成さ れた2光子が 90%を超える高い明瞭度を伴っ た量子干渉を示すことも確認している[1]。

<u>今後の展望</u>

我々は光の光子統計性だけでなく、光子間 の周波数相関を制御することにも成功した。こ のような周波数相関の違いは、単一光子レベ ルでの光と物質との光学応答に大きく影響す る。実際に、二光子スペクトルの違いは二光子 の時間領域分布にも大きく影響し、その違い が単一光子レベルでの非線形光学応答に現 れることが理論的に予想されている[3]。今後、 本光源を利用して半古典論を超えた単一光子 レベルでの光と物質との相互作用を実験的に 解明して行く予定である。

<u>参考文献</u>

[1] R. Shimizu and K. Edamatsu, Opt. Express 17, 1635(2009).

[2] V. Giovannetti, L. Maccone, J.H. Shapiro, and F.N.C. Wong, Phys. Rev. Lett. **88**, 183602 (2002).

[3] M. Nakatani, R. Shimizu, and K. Koshino, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 054401 (2009).