

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	北條 真之
論文題目	同時非線形過程を用いた量子もつれ光子対発生		
(論文内容の要旨)			
<p>光の量子的な性質や量子性に基づく現象は古典光学における実験的制約を排除する新たな光学技術としての可能性を示す重要分野である。その中でも最も注目されている「光の量子もつれ状態」は複数の光子の間に光子が持つ自由度 (周波数、偏光、波数ベクトル) において特殊な相関が存在する量子状態であり、古典的描像では記述することのできない特異な現象を示す。量子もつれ光子対を発生する方法の一つとして、自発パラメトリック下方変換 (SPDC) 過程を用いた手法がある。SPDC過程は1つの光子が偏光、周波数、波数ベクトルの自由度で相関を持つ2つの光子に分裂する非線形光学現象である。これまで、SPDC光子対の光子相関を用いたもつれ状態の形成を基に、SPDC過程と干渉計を組み合わせた量子もつれ光子対の発生手法が多く報告されてきた。しかしながら、量子もつれ状態の自由度を増やししながら高効率かつ量子状態を損失なく発生させることは困難である。この問題を解決する方法として、本研究においては複数のSPDC過程が同軸方向に同時に発生する条件 (同時SPDC過程) を提案し、それを実験的に確かめるとともに、光子対の量子特性を解明した。</p> <p>まず、同時SPDC過程が可能な非線形結晶を選定するために位相整合条件を計算した。その結果、周期分極タンタル酸リチウム (PPSLT) および周期分極ニオブ酸リチウム (PPLN) 結晶において、波長600-850 nmの範囲内にあるポンプ光を用いることで、2組のType-0のSPDC光子対が位相整合可能であることを見出した。適切な結晶周期と結晶温度を選ぶことで、結晶の透明領域である2-5 μmの赤外域をカバーするような発生が可能であることを予想した。実際、638 nmのポンプ光とPPSLT結晶を用いて可視域に発生した光子対の片方 (シグナル光) のスペクトルを測定した結果、理論通りの発生を確認した。</p> <p>次に、同時位相整合した2つのSPDC光子対を同時計測することで、発生における時間的な相関を測定した。赤外光子を光子数計測する手法として赤外上方変換 (UPC) を用いた。UPCの変換用の高強度なポンプ光として、Yb添加ファイバーレーザーを自作し、変換効率29%のUPCに成功した。また、同時SPDC過程のポンプ光としてEr添加ファイバーレーザーを作製し、外部注入同期によりYb添加ファイバーレーザーと同期させた。同時SPDC過程により発生した2つのSPDC光子対間の同時計測を行なった結果、片方の光子対が存在する時はもう片方の光子対は存在しないというもつれ光子対状態の生成に必要な時間的相関を有していることを明らかにした。</p> <p>さらに、同時SPDC光子対によるもつれ状態生成を実験的に実証するため、周波数領域で量子もつれ状態の定量的な評価が可能なHOM干渉実験を行なった。このために、Type-IIでの同時位相整合条件を満たすPPSLT結晶を用いて、偏光と周波数の重ね合わせ状態を生成した。実際、光子の周波数差に対応したビート周波数を有する非縮退のHOM干渉波形の観測に成功した。また、これを干渉波形の理論式でフィッティングすることでもつれ状態を定量的に評価した結果、忠実度0.9という高いもつれ純度の水準を有する量子もつれ光子対状態であることを明らかにした。これらの結果から、同時SPDC過程は簡便かつ広帯域に量子もつれ状態を生成しうる特異な過程であることを実証した。</p> <p>本研究において見出された同時SPDC過程は、簡便かつ汎用的なもつれ光子対発生手法として、今後の量子計測を進展させうる光源であることがわかった。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文では量子もつれ光子対の発生機構における技術発展の必要性に着目し、その解決手法としてSPDC過程の発生機構そのものに注目し、SPDC過程のみを用いたもつれ状態の形成を可能にする同時SPDC過程を提唱した。これまで量子もつれ状態の自由度を増やしながらかつ高効率かつ量子状態を損失なく発生させることに焦点をあてた報告はほとんどなかった。同時SPDC過程は1つの結晶によってのみ生じるため、広い発生帯域や波長可変性を有しながら簡便かつ安定な発生手法としての可能性を有する。しかしながら、同時SPDC過程に関する諸性質については未解明であり、光子対間の時間的相関やもつれ状態生成の可否について明らかにする必要がある。そこで本論文では同時SPDC過程の量子特性を解明することを目的に、理論計算と実証実験によってもつれ状態の生成が可能であることを結論づけている。

本論文前半では同時SPDC過程そのものの実現性に焦点を当て、結晶の選定から発生条件の精査までの理論的な考察を行なっている。その結果、非線形過程の発生率が他の結晶に比べて高く、透明領域も0.3-5.5 μm と赤外域までをカバーするPSSLT結晶およびPPLN結晶において、Type-0のSPDC過程が2種類同時に発生可能であることを見出した。これにより、従来のSPDC過程に比べて発生帯域が広く波長可変性のある光源としての性質を明らかにした。さらに、もつれ状態生成の可否を検証するための論点として2組の光子対間の時間的相関に焦点を当て、光子対間の同時計測を行なった。同時計測するにあたり、赤外域に発生した光子を光子数計測する必要があるが、典型的な半導体検出器では時間分解能や量子効率の観点から困難であった。本論文ではこの問題を、赤外上方変換(UPC)方を用いて克服している。UPCには高強度なパルス光が必要であることから、同時SPDC光子対発生に用いるポンプ光もパルス光源である必要がある。本論文ではファイバーベースの2台のオシレータを自作し、さらに片側のパルスをもう片方のオシレータに外部注入することでオシレータ間の繰り返し周波数を同期させたレーザー系の開発に成功した。これを用いて、発生した同時SPDC光子対のうち赤外域に発生したアイトラー光子を可視域に変換し、可視域に発生したシグナル光と同時計測した。その結果、入力光子が2組のSPDC光子対のいずれかに確率的に分裂する量子状態を生成していることを明らかにした。これにより、同時SPDC光子対は2組の光子対状態の重ね合わせとなっており、もつれ状態生成の必要条件を満たしていることを明らかにした。

本論文後半では、上述の同時SPDC光子対の時間的相関の性質を踏まえ、偏光と周波数領域においてもつれ状態を生成しうるType-II過程の同時SPDC過程に再度注目した。発生条件を精査した結果、PSSLT結晶においてのみ、78-103度に結晶温度に設定することで、Type-IIの同時SPDC光子対が発生可能であることを明らかにした。さらに、周波数もつれ光子対が示す特異な干渉現象であるHOM干渉を測定した結果、もつれ忠実度0.9の高いもつれ純度を有する周波数もつれ状態を生成していることを明らかにした。本手法は単一の結晶と同軸方向のSPDC過程のみで量子もつれ状態生成をした世界で初めての例として、もつれ光子対発生手法の簡便化や次元の拡張、発生帯域の拡大など、発生技術を大きく進歩させうる重要な結果である。

以上のように、本論文では、同時SPDC過程がもつれ状態を生成することを明らかにした。特に、必要な結晶条件や発生時の時間的相関を明らかにし、量子もつれ光子対としての性質を精査した点は高く評価される。よって、博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月19日に論文内容とそれに関連した事項、および論文博士認可に必要な学識についての試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降