

氏名	やぶの まさひろ 藪野 正裕
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成24年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	通信波長帯における周波数無相関光子対発生と多光子量子干渉の研究
指導教員	東北大学教授 枝松 圭一
論文審査委員	主査 東北大学教授 枝松 圭一 東北大学教授 畠山 力三 東北大学教授 中沢 正隆 准教授 清水 亮介 (電気通信大学)

## 論文内容要旨

現在, 量子情報処理・通信技術や量子リソグラフィ技術など光子の量子力学的性質を利用した新しい光技術が提案されており, その実現に向けた研究が進められている。これらの技術の基盤は多数の光子による量子干渉にあり, それゆえ量子干渉性の良い多数の光子の効率的発生技術の確立は重要な研究課題である。このような光子の発生技術として現在最も良く用いられている方法が, 非線形光学結晶を使った自発パラメトリック下方変換(SPDC)である。SPDCでは, ポンプ光と呼ばれる一つの光子から, シグナル光とアイドラー光と呼ばれる二つの光子のペア(光子対)が生成される。SPDCは, 簡単かつ効率的に2光子状態を生成することができるので, これまで様々な量子情報技術の原理検証実験において利用されてきた。しかし, 3光子以上のより多数の光子による量子干渉実験に利用する場合, SPDCには, 光子対が持つ周波数相関が各光子の干渉性を低下させるという問題がある。従来は, この周波数相関を取り除くために, 狭帯域フィルタを用いて各光子の周波数帯域を制限するという方法が用いられてきた。しかしこの方法では, 実際に利用できる光子対は発生した光子対のうち狭帯域フィルタを透過した一部の光子対だけに限られるため, 実効的な光子対の生成効率を上げることは困難である。このことは, 多数の光子による量子干渉を必要とする技術の実現を難しくしており, 特に, 光子検出器の量子効率が低い通信波長帯においては多光子量子干渉実験を行うことは非常に困難であった。この問題を解決するために, 2001年に W. P. Grice らによって群速度整合条件下の SPDC を用いることで周波数相関のない光子対を生成する方法が理論的に提案され, 量子干渉性の良い多数の光子を効率的に発生させる技術として期待されてきた。しかし, これまで群速度整合条件下の SPDC によって生成された光子対を用いて3光子以上の多光子量子干渉を行った報告例はない。そこで本研究では, 周期分極反転  $\text{KTiOPO}_4$  (PPKTP)結晶を非線形光学素子として用いた群速度整合条件下の SPDC により, 通信波長帯に周波数相関のない光子対を効率的に生成する技術を開発した。さらに, 群速度整合条件下の SPDC によって生成された周波数相関のない光子対を用いて, 通信波長帯における4光子量

子干渉計測を行い、開発した光源の多光子量子干渉実験における有効性を検討した。

第一章では、研究の背景を述べた後、本研究の目的及び意義について述べた。

第二章では、PPKTP結晶を使った群速度整合条件下のSPDCについて、発生する光子対の2光子スペクトルを理論計算して、周波数相関のない光子対を発生する最適条件を調べるとともに、実験により周波数相関のない光子対が生成されることを実証した結果について述べた。SPDCによる光子対発生では、エネルギー保存則と運動量保存則(位相整合条件)を満たすことが必要とされるが、本研究では、これら二つの条件に加えて、群速度整合条件： $2V_p^{-1} = V_s^{-1} + V_i^{-1}$  を満たすように非線形光学素子を設計した。ここで $V_j$  ( $j = p, s, i$ )はそれぞれポンプ光、シグナル光、アイドラー光の群速度である。群速度整合条件が満たされる場合、ポンプ光パルスの時間幅 $\Delta\tau$ と非線形光学結晶の結晶長 $L$ を適切に選択すれば周波数相関のない光子対を発生させることが可能になる。本研究では、群速度整合条件を満たしながら通信波長帯に光子対を発生させることのできる非線形光学素子として、PPKTP結晶(結晶長 $L = 30$  mm)を用いた。KTP結晶は、ポンプ光の波長 $792$  nm、シグナル光とアイドラー光の波長 $1584$  nmの場合に群速度整合条件を満たす。この条件において疑似位相整合条件を満たす分極反転周期は $46.1$   $\mu\text{m}$ である。数値計算により、発生する光子対の2光子スペクトルを計算し、周波数相関のない光子対が生成される条件が結晶長 $L = 30$  mmに対してパルス時間幅 $\Delta\tau = 2.3$  ps (FWHM)であると求められた。実験では、モードロックチタンサファイアレーザーからの中心波長 $792$  nm、パルス時間幅 $\Delta\tau = 2.3$  psのポンプ光をPPKTP結晶に照射して光子対を生成し、その2光子スペクトルの測定を行った。その結果、ほぼ周波数相関のない光子対が生成されていることを実証した。また2光子スペクトルのSchmidt分解を用いた解析から、光子のスペクトル純粋度として $83\%$ という高い値を得た。さらに、光子対の同時計数のポンプ光強度依存性の測定結果から光子対生成効率を見積もり、 $48,000$  pairs/mW/secという高い値を得た。この値は従来のものと比較して10倍以上高い値であり、群速度整合条件下のSPDCを用いることによって、周波数無相関かつ効率的な光子対生成が可能であることを示している。

第三章では、上述した周波数相関のない光子対を利用して、通信波長帯における4光子量子干渉実験を行った結果について述べた。本研究では、多光子量子干渉実験としてフォトリック・ド・ブロイ波長の観測を行った。単一光子としての波長 $\lambda$ を持つ $N$ 個の光子が一体となって干渉するとき、その光子群としての実効的波長は $\lambda/N$ になることが知られている。この光子群としての波長はフォトリック・ド・ブロイ波長と呼ばれており、回折限界を超える量子光リソグラフィ技術などへの応用が期待されている。これまでに、可視光帯及び近赤外帯( $800$  nm帯)における5光子状態までのフォトリック・ド・ブロイ波長の観測例が報告されているが、効率的な光源および光子検出器の開発が遅れている通信波長帯においては、3光子以上の多光子状態に関する報告はない。フォトリック・ド・ブロイ波長は、マッハツェンダー(MZ)干渉計のような2モード位相干渉計において、NOON状態と呼ばれる多光子状態： $(|N, 0\rangle_{A,B} + |0, N\rangle_{A,B})/\sqrt{2}$ の量子干渉を測定することにより観測することができる。このような

N 光子状態の干渉を MZ 干渉計で測定すると、干渉計の 2 モード間の光路差に対して、フォトニック・ド・ブローイ波長( $\lambda/N$ )に対応した間隔を持つ干渉縞を観測することができる。本研究では、通信波長帯での多光子量子干渉実験で必要となる長時間の測定においても十分な安定性を得るために、偏光モードを用いた MZ 干渉計を提案・構築し、それを用いて  $N = 1, 2, 4$  の状態について測定を行った。その結果、1 光子状態の干渉では光の古典的波長( $\lambda$ )に対応する干渉縞が得られるのに対して、2 光子状態と 4 光子状態では各々、 $\lambda/2$  と  $\lambda/4$  となるフォトニック・ド・ブローイ波長に対応した干渉縞が明確に得られた。また、1 光子、2 光子、4 光子状態における干渉縞の明瞭度は各々  $V = 98\%$ ,  $88\%$ ,  $74\%$  という高い値が達成された。古典光を用いて同様の干渉を測定した場合の 4 光子干渉における明瞭度の上限は  $20\%$  であることが報告されており、本研究ではこの値を十分に超えた明確な 4 光子量子干渉の測定に成功した。この結果はまた、群速度整合条件下の SPDC を用いて生成した周波数相関のない光子対の、多光子量子干渉実験における有用性を示すものである。

第四章では、本論文の総括を行い、今後の展望について述べた。上述の研究結果から、群速度整合条件下の SPDC を用いた周波数相関のない光子対の生成は、多光子量子干渉実験における量子光源として有効であり、線形光学量子計算をはじめとする多くの技術に対して利用可能であるものと結論付けられる。本研究では、この技術を用いて、通信波長帯において初めて 4 光子量子干渉実験を行うことに成功した。今後は、より多数の光子を用いた量子干渉実験の実現が期待されるが、それには通信波長帯における光子検出器の量子効率の向上が必要不可欠である。近年の光子検出技術の発展は目覚ましく、特に超伝導体を用いた光子検出器において、通信波長帯においても極めて高い量子効率を示す光子検出器が開発されつつある。このような優れた光子検出技術と本研究で実証された多光子発生技術を融合することで、近い将来、通信波長帯においてより多くの光子を用いた多光子量子干渉実験を非常に効率的に実現できるようになるものと考えられ、本研究の成果がその先駆となるものと期待する。

# 論文審査結果の要旨

量子情報通信技術において、光の量子(光子)は、量子情報を伝送する媒体として最も優れており、種々の量子情報通信プロトコルの原理検証実験にしばしば利用される。光子を用いた量子情報通信技術を高度化するためには、純粋なスペクトル状態をもつ多数の単一光子や量子もつれ光子を高効率で発生しうる光源が必要である。自発パラメトリック下方変換(SPDC)によって発生する光子対は、伝令付単一光子や量子もつれ光子対として利用でき、光子を用いた量子情報通信技術において特に有用である。しかし、一般に双方の光子間には周波数相関があるため、一方の光子についてのスペクトルが純粋な状態とはならず、独立に発生した光子間には量子干渉性をもたないという欠点を有している。この問題は、多光子を用いた量子情報通信技術を実現する際の大きな障壁となる。従来は、帯域通過フィルタ(BPF)を用いてスペクトルを純粋化する手法が用いられていたが、この方法では光子対の生成効率が大きく低下してしまうという問題があった。最近、SPDCにおける位相整合条件の周波数分布を考慮した「群速度整合(GVM)」と呼ばれる技術を用いることで光子間の周波数相関を制御する手法が注目されている。そこで著者は、GVMを利用することで周波数相関を有さない光子対を通信波長帯において高効率で発生する方法を開発し、その特性を詳しく調べた。そして、この手法で発生した光子対が非古典的な多光子量子干渉を示すことを実験的に明らかにした。本論文はその研究成果をまとめたもので、全編4章よりなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的、関連する先行研究等について述べている。

第2章では、まず、SPDCおよびGVMの原理と、それらを用いた周波数無相関光子対の生成法およびその評価方法について述べている。そして、開発した周波数無相関光子対源の一光子および二光子スペクトル、光子対生成効率等を測定し、その特性を解析している。特に、二光子スペクトルのシュミット分解によって一光子スペクトル状態の純粋度を求め、それが0.83という優れた値を示すことを明らかにした。また、この光源の光子生成効率がBPFを用いた従来法と比して十倍程度高いことを示した。これらの結果は、本研究で開発した光源が高い純粋度と効率を併せ持つ高性能なものであることを示している。通信波長帯においてこのような高い純粋度と生成効率をもった光子対源の開発は世界的にも類がなく、高く評価できる。

第3章では、開発した光源から発生した光子対が高い多光子量子干渉性を示すことを検証するために行った、フォトニックド・ブroy波長の測定実験について述べている。光路干渉計に比して安定度の高い偏光干渉計を採用する等の工夫によって、光子検出器の量子効率が低い通信波長帯でも長時間にわたって安定した測定を可能とする量子干渉測定系を構築した。その結果、2光子、4光子を用いたフォトニックド・ブroy波長の測定において、各々0.88および0.74という高い明瞭度をもって古典限界を破る量子干渉を観測することに成功した。特に、通信波長帯において4光子量子干渉の観測に成功した例は過去になく、当該分野を先導する研究として極めて高く評価できる。

第4章は結論であり、各章の成果をまとめるとともに、本研究で開発した光源の量子情報通信・量子光学への応用可能性と、今後の課題について議論している。

以上要するに本論文は、通信波長帯における高効率な周波数無相関光子対源を開発し、生成した光子対が高い多光子量子干渉性を有することを世界に先駆けて明らかにしたものであって、電子工学および量子情報通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。