

	ジン ルイボ
氏 名	金 鋭博
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成23年9月14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	純粋単一光子源の開発とその量子光学への応用
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 中沢 正隆 東北大学教授 上原 洋一 東北大学教授 山田 博仁

論 文 内 容 要 旨

The making of spectrally pure single-photon source is a hot research topic in recent years. In this thesis, we prepare such heralded pure single photon state in KDP crystal, with a purity of 0.97 derived from the experimental data of joint spectral distribution. This kind of pure single photon state was utilized to interfere with a weak coherent state (local oscillator), and a high-visibility of 89.4% was achieved, for the first time, without the use of band pass filters. This nonclassical interference can be applied to construct entanglement state from independent sources. We tested the violation of Bell-CHSH inequality with such entanglement source, which is 60 time brighter than the earlier experiment. Finally, this pure photon source was employed in homodyne detection of the single photon state. For the first time, homodyne detection of the single photon state was realized with a fiber beam-splitter, without the use of band pass filters.

This thesis is organized as follows. Chapter 1 is the introduction part, where I introduce the background of this research. In chapter 2, after discussing the basic phenomenon of SPDC, I investigate the generation of pure single photon state by group velocity matching and the experimental measurement of joint spectral distribution. Chapter 3 is about the nonclassical interference between pure single photon state and weak coherent state, including both theoretical analyses and its experiment realization. In chapter 4, such nonclassical interference is utilized to make entangled state from independent sources. In chapter 5, we change our study from discrete variables to continuous variables— homodyne detection of the pure single photon state we prepared in chapter 3. Finally, I summarize the thesis in chapter 6.

論文審査結果の要旨

近年進展の著しい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を高効率で発生し得る光源が必要である。自発パラメトリック下方変換(SPDC)は、発生する光子対のうちの片方の光子が他方の存在を指示する伝令付単一光子源として特に有用であるが、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ではないという欠点を有する。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「拡張位相整合(EPM)」と呼ばれる技術を用いることで二光子間の周波数相関を除去し、BPFを用いずに純粋なスペクトル状態をもつ伝令付単一光子（以下では純粋単一光子と呼ぶ）を高効率で発生する方法が注目されている。そこで著者は、EPMを用いた純粋単一光子源を開発し、その特性を詳しく調べた。そして、この光源を用いることで、光子を用いた量子情報処理の基礎技術となる、単一光子と微弱なレーザ光（コヒーレント光）との間の量子干渉実験を従来にない高い精度と効率で行い得ることを明らかにした。さらに、この方法を応用して、独立した二光子間に量子もつれ状態を作り出すことが可能であることを示した。本論文はその研究成果をまとめたもので、全編6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、SPDCとEPMを用いた純粋単一光子の生成法について述べた後、開発した光子源の一光子および二光子スペクトル、光子対発生効率等を測定し、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単一光子のスペクトル純度を求め、それが0.97という高い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数十倍高いことを示した。これらの結果は、本研究で開発した光源が高い純度と効率を併せ持つ高性能なものであることを示しており、高く評価できる。

第3章では、得られた純粋単一光子と微弱なコヒーレント光とが高い量子干渉性を示すことを検証するために行った、Hong-Ou-Mandel (HOM)干渉の実験結果について述べている。その結果、独立した光源を用いたHOM干渉としては極めて高い明瞭度(89%)の干渉を観測し、開発した光源のスペクトル純度の高さを確認している。この結果は、EPMを用いて発生した純粋単一光子とコヒーレント光とが高い量子干渉性を示すことを実験的に検証した最初の例となるもので、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章では、純粋単一光子と微弱コヒーレント光との間の量子干渉性を応用し、これらの独立した光子間に偏光に関する量子もつれを作り出す実験結果について述べている。量子もつれの定量的評価としてBell不等式の破れを測定し、標準偏差の6倍以上の精度で不等式を破るという結果を得た。これは、BPFを用いた先行研究と比して約60倍の効率でより精度良くBell不等式の破れを示したものであり、本研究で開発した光源の実用性の高さを示すものとして重要である。

第5章では、発生した純粋単一光子のホモダイン検出を行い、単一光子状態の位相空間上での量子的擬確率分布（ウィグナー関数）を求める試みについて述べている。ホモダイン検出器の検出効率が十分ではないという条件の中で、単一光子状態の測定を可能とする結果を得ており、光子を用いた離散的量子情報プロトコルと位相空間における連続量プロトコルとを組み合わせたハイブリッド型量子情報通信技術へ向けての指針を得たものとして評価できる。

第6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、EPMを用いた高効率な純粋単一光子源を開発し、生成した純粋単一光子がコヒーレント光と高い量子干渉性を示すという有用性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。