

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 牧野 兼三

量子情報処理において、単一光子状態は量子ビットを実現する候補として非常に重要である。量子計算の中でも線形光学量子計算は、複数の単一光子状態を用いて光子干渉と光子検出によって量子計算を行う手段として近年提案されたものである。その実現にはあるタイミングに複数の単一光子状態を準備し、それらを同期して干渉させる必要がある。しかし、純粋な単一光子状態を任意のタイミングに準備することは実験上難しい。高純粋な単一光子状態は、これまで伝令付きと呼ばれるパラメトリック下方変換と光子検出器を用いた方法で生成されている。伝令付きは単一光子状態を生成するタイミングが完全にランダムであるため、複数の単一光子状態を同時に準備するのは非常に稀な確率でしかできなかった。したがって大規模な量子ビットの操作を実現するためには、まずタイミング制御が可能な単一光子源を開発し、それを複数台用いて光子干渉を実現する必要がある。

本研究では、タイミング制御が可能な単一光子源とそれを同期する技術を新たに導入し、量子計算の実現に向けて2光子干渉の同期を行った。具体的には、連結共振器をメモリーとして単一光子状態を片方の共振器に閉じ込めておき、他方の共振器の共振条件を変えることで、保存した単一光子状態を取り出す。これにより高純度な単一光子の保存とオンデマンドな取り出しの両立が可能になった。そして2台の光子源を同期することで、2光子干渉の中で最も基本的な50:50ビームスプリッターによる有名なHong-Ou-Mandel干渉を起こし、Hong-Ou-Mandel状態の生成に成功した。量子状態をホモダイン測定によって特徴づけることで、Hong-Ou-Mandel状態に特徴的な直交位相振幅の同時分布を確認した。

また過去に論文提出者が光検出器の高速化に取り組んだことを踏まえ、新たに広帯域なホモダイン検出器を開発した。量子情報処理において取り扱う周波数帯域が広いほど、より密に情報を送受信することが可能になり、単位時間あたりに処理できる情報量を増大させることができる。特に光を用いた量子情報処理の場合、量子情報をエンコードする光の波束幅を時間的に短くすることができる。これまでの連続量を用いた量子情報処理実験では、実験系で取り扱える帯域がホモダイン検出器帯域の10 MHz程度に律速されており、その広帯域化が課題であった。本研究では高い量子効率と100 MHzの広帯域に渡り動作するホモダイン検出器の開発に成功した。

本論文は以下の6章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、導入として本研究の背景について述べ、その上で本研究の概要を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、後続の章で必要となる基本的な理論について述べている。量子光学、基本的な量子状態を紹介している。

第3章では、連結共振器を用いた伝令付き単一光子状態の保存と取り出しについて述べ

ている。まず、連結共振器の古典的・量子的なモデルを示し、連結共振器から放出される単一光子状態の時間モードについて解析している。続いて実験セットアップ、連結共振器の構成、単一光子状態が放出される時間モードの実験的な推定方法について説明している。そして、連結共振器の結合条件を強結合・臨界結合・弱結合と変えた実験結果について述べている。さらに、時間遅延を与え、単一光子状態を保存しオンデマンドに取り出した実験結果について述べている。450 ns 以内の時間遅延では、非古典性の指標となる Wigner 関数が負の値を持つ十分条件である、純度 0.5 以上の単一光子を取り出せることを実証している。また、保存時間と波束形状についての独立した可制御性を示している。これによりタイミングと波束形状の一致が不可欠である干渉実験への応用可能性を示している。さらに、後続の章で行う 2 光子干渉実験に向けて、最適な結合条件について示している。

第 4 章では、2 台の連結共振器型単一光子源による Hong-Ou-Mandel 状態の生成について述べている。まず古典的な干渉と量子的な干渉の理論について述べ、続いて Hong-Ou-Mandel 状態について説明している。また実験セットアップ、連結共振器、同期のセットアップと方法について述べられている。特に光学系の安定化フィードバック制御器を自動復帰する手法について新たに導入された手法が説明されている。予備実験では 2 つの単一光子源が同一の性能を示すことが詳しく調べられている。光子干渉実験では、同期により 2 光子同時生成の頻度のエンハンスメントが得られている。干渉計の同期した入力状態と出力状態について、2 モード直交位相振幅の同時分布が示されており、特徴的な分布がはっきりと見てとれる。定量的にはホモダイントモグラフィーによって Hong-Ou-Mandel 状態が完全に特徴づけされており、Wigner 関数が負の値を持つほど強い非古典性を示す状態の生成に成功している。

第 5 章では、本研究で開発した 100 MHz 帯域のホモダイン検出器について述べている。開発した光検出器の設計、製造技術と実験結果について説明されている。連続量の量子光学実験において帯域を律速していたホモダイン検出器が広帯域化・高速化に成功したことで、装置の高速化や光学系の小型化・安定化が期待でき、新たな実験の可能性が開けた。

第 6 章では、本研究をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本研究では、連結共振器によりタイミング制御可能な単一光子源を開発し、その実証実験を行った。単一光子源を最適化するために、連結共振器の結合条件を強結合、臨界結合、弱結合と変えて調べ、強い非古典性をもつ状態を共振器に保存し、取り出せることを確認した。また、この単一光子源を 2 台用意し、光子干渉の基本要素である Hong-Ou-Mandel 干渉実験を行った。高い単一光子純度を保ったまま、光子の保存による 2 光子同時生成の頻度のエンハンスメントが得られた。その結果、ホモダイン測定を用いて特徴的な四葉の分布を観測し、その量子状態を完全に明らかにした。したがって本研究の成果は、光子を用いた量子計算を実現する上で、重要な意義があるものと認められる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認められる。