

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 宮田 一徳

量子情報処理は、量子力学特有の現象を情報技術に取り入れた、新しいタイプの情報処理である。特に、いわゆる量子コンピューターは、現在の（古典）コンピューターでは計算量的に困難なある種の問題を、効率的に解くことができると期待されている。その基本要素が、ユニバーサルゲートと呼ばれる有限個のユニタリー変換の集合である。特に光の連続量量子情報処理のユニバーサルゲートは、光の直交位相振幅について 2 次以下の Hamiltonian からなる Gaussian ゲートと、3 次以上の Hamiltonian からなる非 Gaussian ゲートに分けられる。現在、ユニバーサルゲートの中で実験的に実現されていないのは、非 Gaussian ゲートただ 1 つである。しかし、高次の Hamiltonian の実現には、高次の非線形光学過程が要求される。光の量子性が顕著となるような微弱光を用いて高次の非線形光学効果を得るのは一般に困難である。そのような理由から、非 Gaussian ゲートは今日に至るまで実現されていない。このことが、光の連続量量子情報処理実現のボトルネックとなっている。

本研究では、非 Gaussian ゲートの 1 つである「3 次位相ゲート」について、その実現法の検討から、要素技術の実験的実証までを総合的に行っている。3 次位相ゲートの実現法の検討においては、補助入力・エンタングルメント・測定・フィードフォワードを用いる先行研究をベースとして、要求される補助入力の少ない、より実現的な手法を提案した。また、その入出力関係に関する考察から、要求される最適な補助入力状態を明らかにした。要素技術の実験的実証においてはまず、3 次位相ゲートの非線形性の起源である非線形フィードフォワードを実現した。また、3 次位相ゲートの非古典性の起源となる光子数重ね合わせ状態を時間領域で指数増大型となる波束に生成し、その振幅値のリアルタイム測定に成功した。

本論文は 5 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、後の章に必要な基礎事項を記述し、いろいろな数式や術語の表記方法を確認している。具体的には、量子力学一般の基礎事項、量子化された電磁場、光の基本的な量子状態と量子操作、量子状態の表現方法、測定・解析方法、光共振器・非線形光学の量子的取りあつかい、そして連続量量子計算に必要な量子操作について述べている。特に、3 次位相ゲートの実現法や非線形フィードフォワードの基礎となる、テレポーテーションベースの量子操作の考え方を導入している。

第 2 章では、3 次位相ゲートのシンプルな実現法を提案している。まず、3 次位相ゲートの実現法に関する先行研究を紹介し、それぞれについて詳細な考察を加えている。Gottesman らによって提案された GKP スキームにおいては、3 次位相ゲート実現の困難が Gaussian ゲートの構築と補助入力状態の準備に分解されることを述べ、補助入力状態の生

成手法を数値的に検証している。さらに、GKP スキームの実験的な実現可能性を検討し、実験系が非常に巨大で不安定になると予想されること、また多数の補助入力の不完全性が累積することを指摘している。その後、本論文提出者の成果として、GKP スキームを元にしたより簡略な 3 次位相ゲートの実現手法を提案している。提案した手法の入出力関係を考察し、ゲートの非線形性が古典的なフィードフォワードで与えられ、ゲートの非古典性は補助入力状態による出力ノイズの除去として現れることを明らかにしている。そして、出力ノイズを評価指標とすることで、近似的な補助入力状態の検討方法を与えている。実際に、現実的に用意できる光子数重ね合わせ状態であって、ノイズを最小化する最適な係数を持つものを数値的に検討している。

第 3 章では、3 次位相ゲートの非線形性の起源である、非線形フィードフォワードの実験について述べている。まず、非線形フィードフォワードが動的にゲインを切り替えることのできるスキューニングゲートとしてはたらくことを述べている。実際に、非線形フィードフォワードに必要となる非線形演算回路を作製し、1 MHz の外部信号に追従してスキューニングレベルを変更できるゲートの構築に成功したことを示している。また、入力に 5 MHz で連続的に変位するコヒーレント状態を用いることで、この実験系が広い帯域の入力に対して適切に動作することを確認している。以上の結果が、動的制御可能な非線形光学操作として最初の例であることを述べている。

第 4 章では、3 次位相ゲートの非古典性の起源である光子数重ね合わせ状態を、時間領域で指数増大型となる波束に生成する実験について述べている。まず、3 次位相ゲート中の測定における振幅値の測定遅延時間が問題になることを述べている。そして、測定される状態が時間領域で指数増大型となる波束に用意されていれば、ローパスフィルターによって振幅値のリアルタイムな測定が可能となることを示している。実際に、偏光について非対称な光パラメトリック発振器を用いた伝令つき状態生成により、単一光子状態や 0 と 1 光子数の重ね合わせ状態といった非古典的状态が、指数増大型波束に生成できることを示している。さらに、その振幅値をローパスフィルターによってリアルタイムに測定できることを確認している。最後に、生成された重ね合わせ状態のうちの 1 つが、近似 3 次位相状態の最も簡単な例になっていることを示している。

第 5 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、3 次位相ゲートの実現手法の理論的な検討と要素技術の実験的な実証の両方を行った。実現手法の検討は、これまで連続量量子計算のボトルネックであった非 Gaussian ゲート実現への道筋を具体的に与えている。要素技術の実証は、3 次位相ゲートの構成要素である非線形フィードフォワード系と補助入力状態生成系をそれぞれ実現したものであり、3 次位相ゲート実現への足がかりを作っている。本研究の成果は、ユニバーサルな連続量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。