

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 小川 尚史

量子光学における究極的な目標は、光の量子状態に対する任意の量子ゲートを実現することである。光に対する量子ゲートは、対応するハミルトニアンが直交位相振幅の演算子について 2 次以下の項からなる「ガウス型量子ゲート」と 3 次以上の項を含む「非ガウス型量子ゲート」に分類することが出来る。ガウス型量子ゲートについては、先行研究において実装例がある。一方、非ガウス型量子ゲートについては、量子情報処理に用いる単一光子レベルの微弱光の場合は非線形な相互作用が得にくいといった難点があり、現在に至るまで実装例は報告されていない。この問題の回避策として近年、量子テレポーテーションを応用した量子計算の手法が提唱されている。これは、入力状態と、補助状態の非ガウス型状態をエンタングルさせ、射影測定やフィードフォワードによって計算を行うというものであり「オフラインの手法」とも呼ばれる。オフラインの手法を用いると、非線形光学効果を直接作用させることなく非ガウス型量子ゲートを構築することが可能であるが、多数の補助状態を用意する方法や非線形なフィードフォワードを高速に行う方法など解決すべき課題が多く、やはり実現には至っていなかった。

本研究では非ガウス型量子ゲートのうち、ハミルトニアンが 1 つの直交位相振幅の n 乗で表される「 n 次位相ゲート」をオフラインの手法を応用して実装する方法について理論・実験の両面から検討を行っている。理論面では現実の実験手法も考慮し、先行研究よりも少数の補助状態で n 次位相ゲートを実現する手法を提案している。また実験面では、非線形フィードフォワードを高速に行うための、2 つの新手法を開発している。1 つは補助状態の非ガウス型状態を時間領域で指数増大となる波束に生成し、直交位相振幅をリアルタイムに測定することを可能とするものである。これを更に改良して、波束自体の時間幅の短縮による高速化にも成功している。もう 1 つは非線形フィードフォワードの装置そのものであり、高速アナログ・デジタル変換を搭載した FPGA(field-programmable gate array) ボードを用いた、デジタル非線形フィードフォワードの実証実験に成功している。

本論文は 8 章から成る。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用語や演算子の定義・表記方法などについてまとめている。また、本研究の前提となる実験技法について述べている。

第 3 章では、 n 次位相ゲートを効率的に実装する方法についての理論提案を行っている。まず、オフラインの手法を応用した先行研究の理論をまとめ、その実装上の問題点として目的の量子ゲートの次数 n に対して必要な補助状態の数が指数関数的に増加する点などを指摘している。続いて実装に適した非ガウス型量子ゲートとして、最小限の補助状態の数

で 3 次位相ゲートを実装する方法を提案し、それをさらに一般の n 次位相ゲートに拡張する方法について述べている。この時、必要な補助状態の数は n に対して線形なスケールであるということを示している。

第 4 章では、 n 次位相ゲートの補助状態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、直交位相振幅のリアルタイム測定を行う実験について述べている。ここでは非対称光パラメトリック発振器(OPO)という新しいタイプの OPO を開発し、高純度な非ガウス型状態を指数増大波束に生成することに成功している。また、簡単なローパスフィルタでその直交位相振幅の情報を高速に測定出来ることも実証している。

第 5 章では、非対称 OPO を改良し、広帯域な指数増大波束に非ガウス型状態を生成する実験の結果について述べている。生成される状態の時間幅を第 4 章の実験(約 50 ns)と比較して約半分の 26 ns に短縮することに成功したことが示されている。

第 6 章では、高速アナログ・デジタル変換搭載 FPGA ボードを用いたデジタル非線形フィードフォワード系の開発と、動作検証として行った動的スクイーミングゲート実験の結果について述べている。動的スクイーミングゲートは 3 次位相ゲートの非線形フィードフォワードにあたる量子ゲートであり、低遅延かつ広帯域であることが必要とされることを述べている。過去に論文提出者が構築した装置よりも帯域等を改善するため、実験装置の構築にあたっては、高速アナログ・デジタル変換搭載 FPGA ボードの導入に加えて、従来の約 2 倍の 200MHz 帯域を持つ広帯域ホモダイン検出器の開発も行っている。これらの新開発の技術を用いた動的スクイーミングゲートの実験では、1 段分のフィードフォワードの遅延が 40 ns 程度であり、非線形な計算部分を含めて 50 MHz 以上の広帯域な波束の量子状態に対して正しく動作していることが示されている。この手法は、FPGA ボードのプログラムの書き換えによって一般の n 次位相ゲートのフィードフォワードにも応用可能であるということも示されている。

第 7 章では、本研究の実験結果を踏まえて 3 次位相ゲートを実装する方法について述べている。第 5 章と第 6 章で開発した実験手法を組み合わせることで、合計の遅延約 100 ns の高速非線形フィードフォワードが実現可能であることが示されている。タイミング調整の光学遅延路の設計など、3 次位相ゲートの具体的な実装方法についても述べられている。また操作の非ガウス性についての考察が行われている。

第 8 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、オフラインの手法を応用した n 次位相ゲートの実装手法についての理論提案と、高速デジタル非線形フィードフォワードの実証実験を行った。本研究の成果により、非ガウス型量子ゲートの実現への具体的な方針が示され、必要な実験技法の基本的な動作も一通り実証された。従って本研究は、光に対して非ガウス型量子ゲートを含む任意の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る。