

博士論文(要約)

高速デジタル非線形フィードフォワードを用いた
 n 次位相ゲート実現法の研究

小川 尚史

研究背景

近年、情報処理の更なる拡大・発展の方向性として高い注目を集めているのが「量子情報処理」である。これは、量子力学的現象を積極的に利用することで従来とは原理から異なる情報処理を行うものである。量子情報処理に用いる物理系については、半導体中のスピンや超伝導回路などいくつか候補があるが、中でも「光」は高いエネルギースケールで量子性が見えるという強みを活かして、様々な原理実証に用いられてきた。

光を用いた量子情報処理のボトルネックとなってきたのが、光の量子状態に対するユニタリ変換「量子ゲート」のうち一部のしか実現していないという点である。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。このうちガウス型量子ゲートについては、先行研究において多数の実装例がある。任意の量子計算を実現するためには、ガウス型量子ゲートに加えて少なくとも1つの非ガウス型量子ゲートが必要であると知られている。しかし、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、現在に至るまで非ガウス型量子ゲートの実装例は報告されていない。このために、光を用いて実装出来る量子計算も一部のクラスに限られていた。

この問題の回避策として、量子テレポーテーションを応用して、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成するという方針が検討されている。これは、入力状態と補助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。しかしオフラインの手法についても、補助状態の生成方法や複雑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、実現には至っていなかった。

本研究の概要

筆者は、オフラインの手法を応用した非ガウス型量子ゲートの実現方法を全体のテーマとした研究を行ってきた。その過程において、以下のような成果を得た。

(1) n 次位相ゲート実現法の理論提案

先行研究において、3次のハミルトニアンに対応する非ガウス型量子ゲートである「3次位相ゲート」をオフラインの手法で構築する理論提案が行われている。しかしこれらは、多数の補助状態が必要であるなど、現実の実験技法を考慮すると実用性に疑問があった。必要な補助状態が多いということは、装置が複雑化するので不安定になりやすく、また、補助状態の不完全性（ロス等）が積み重なって最終的な操作の精度が悪化する可能性がある。本研究ではまず、最小限の数の補助状態で3次位相ゲートを構築する方法についての理論提案を行った。また、補助状態の近似方法についても検討し、現実の実験技法を考慮した上でノイズが最小になる近似方法を提案した。

本研究では提案した3次位相ゲートの手法を任意の次数に拡張し、 n 次位相ゲートの構築方法も考案した。従来の理論では、3次位相ゲートとガウス型量子ゲートの組み合わせで高次のゲートを構築する方法が知られていたが、目的の量子ゲート次数に対して必要なリソース（補助状態の数など）が指数関数的に増大するという問題があった。一方、本研究の n 次位相ゲートの場合は量子ゲートの次数に対して

必要な補助状態の数は線形となる。

(2) 指数増大波束への非ガウス型状態生成とリアルタイム直交位相振幅測定実験

量子テレポーテーションを応用した非ガウス型量子ゲートの実装においては、測定からフィードフォワードの時間遅延をなるべく小さく抑えることが重要である。遅延が大きくなると、フィードフォワードのタイミングを合わせるために光のパスにも長い遅延路を追加する必要があり、実験装置が不安定になるからである。

非ガウス型量子ゲートのフィードフォワードの際には、ノイズの中から目的の量子状態の直交位相振幅の情報を抽出するという手順が必要である。筆者らは、この部分を高速化するために「指数増大波束」という波束モードを利用するという手法を考案した。この手法は、ホモダイン測定から簡単なアナログフィルタを通すだけで、ほぼ遅延なく直交位相振幅の情報が得られるので「リアルタイム測定」と呼んでいる。本研究では実際に「非対称光パラメトリック発振器 (AOPO)」と名付けた新しいタイプの共振器を用いて単一光子状態や光子数重ね合わせ状態を指数増大波束に生成し、生成された状態に対する直交位相振幅のリアルタイム測定の実証実験を行った。結果、高純度な状態を指数増大波束に生成出来ていること、及びその情報をほとんどロス無くリアルタイム測定出来ることが確認された。

(3) 広帯域な指数増大波束への非ガウス型状態生成実験

リアルタイム測定を使っても波束の時間幅分の必ず遅延が発生するので、フィードフォワードの高速化のためには波束自体の時間幅の短縮も重要である。波束の時間幅が短いということは、周波数領域では広帯域であるという意味である。よって、本研究では上述のリアルタイム測定の実証実験の次のステップとして、更に時間幅の短い(広帯域な)指数増大波束に非ガウス型状態を生成する手法の開発に取り組んだ。AOPO の設計を根本的に見直し、ほぼ同じ純度を保ちながら波束の時間幅を約 50 ns から約 26 ns と半分近くにまで短くすることに成功した。

(4) 高速 ADC/DAC 搭載 FPGA ボードを用いたデジタルフィードフォワードの実験

オフラインの手法を用いた非ガウス型量子ゲートにおいて、補助状態と共に重要な役割を果たすのが、直交位相振幅の情報から非線形な計算を行ってフィードフォワードを行う部分(非線形フィードフォワード)である。本研究では、非線形フィードフォワードの実装方法として、FPGA(field-programmable gate array)を用いたデジタルフィードフォワードを検討した。

FPGA を用いたデジタルフィードフォワードの実現に当たってネックとなっていたのが、AD/DA コンバータも含めた遅延が大きくなりがちであるという点である。そこで、全体の遅延を数十 ns オーダーに抑えるため高速な AD/DA コンバータ等を選定し、それを搭載した特注 FPGA ボードを導入した。FPGA の開発と同時に、従来のホモダインディテクタの 2 倍近い 200 MHz の帯域を持つ広帯域ホモダインディテクタも開発した。

実際にこの FPGA ボードを用いて、3 次位相ゲートのフィードフォワードに対応する量子ゲートである「動的スクイーミングゲート」を構築して応答を評価した結果は、遅延が約 40 ns、帯域が約 100 MHz であった。この結果は、筆者らが修士課程で行った実験よりも大幅に性能が向上されている。FPGA はプログラム次第で異なる回路を実装することが出来るので、本実験の手法は 3 次位相ゲート以外にも様々な量子ゲートのフィードフォワードへの応用が可能である。

本研究は、以上の成果によって n 次位相ゲートの実現に向けて具体的な道筋を示したと言える。次のステップとしては、(3), (4) の装置を結合し、実際に 3 次位相ゲートの実験を行うことになると考えられる。また、 n 次位相ゲートが実現すれば、原理的には任意の量子計算が可能となるので、非ガウス型量子ゲートも含む計算エラーについての理論研究等、光を用いた量子計算の実用化に向けた研究が加速することが期待される。