

氏名	きた がわ あきら 北 川 晃
学位の種類	博士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2352 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科原子核工学専攻
学位論文題目	Manipulation of Photon Number-States and Its Liner Optical Realization (光子数状態の操作とその線形光学的方法による実現)
論文調査委員	(主査) 教授 山本克治 教授 今西信嗣 教授 北野正雄

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、光子数状態を情報媒体とした量子情報処理・通信系構築をめざして、その切断や反転など様々な操作について理論的基礎研究を行い、その実現性を検討した成果についてまとめたものであって、6章からなっている。

第1章は序論であり、量子情報処理・通信系について概説し、光子数状態の操作について研究するという本論文の背景と目的について述べている。

第2章では、光子数状態操作を行うために用いる量子的光源や線形光学素子について記述している。まず、電磁場の量子化と光の量子状態について概説している。そして、光の絡み合った量子状態 (EPR源) を生成するための一次光源として用いられる真空のスティーズド状態が、パラメトリック下方変換過程より生成されることについて説明している。つぎに、ビームスプリッターと位相変調器の作用について述べ、それらを組合せることによって、ベル測定器に必要な光のモード間のユニタリー変換が実現されることを示している。また、0, 1, 2個以上の光子数状態を区別できる単一光子検出器の現状と開発状況について述べるとともに、量子効率と暗計数を用いた確率演算子測度による理論的記述を与えている。

第3章では、まず、2モードの光で光子数と位相差の同時固有状態となるベル状態を示している。そして、位相差のエルミート演算子を定義して、位相演算子についての長年の議論に一つの明確な解答を与えている。また、この演算子を用いて2モード光子状態の位相差分布を評価している。つぎに、2つの真空スティーズド状態のそれぞれ片方のモードを対として、光子数と位相差のベル状態の測定を行うことで、量子的に絡み合った光子数と位相差のベル状態を得る方法を見出している。さらに、この光子数と位相差ベル測定を実際に行うために、線形光学素子、すなわちビームスプリッター、位相変調器および単一光子検出器を組み合わせた測定器を提案し、光子数と位相差のベル測定について、これらの線形素子のパラメータを決定している。

第4章では、光子数と位相差のベル測定によるテレポーテーションの方法を用いて実現される光子数状態の様々な操作について調べている。EPR源としては、光子数差ゼロの真空スティーズド状態、および第3章で述べた方法で得られる光子数と位相差のベル状態を用いている。これらのEPR源の片方のモードと入力状態に対して光子数と位相差のベル測定を行うと、一定の操作が施された出力状態が得られる。そして、ある特定の測定結果が得られた場合、入力状態の忠実なテレポーテーションが条件付きで実現できることを示している。一般にはこの方法で、光子数状態の切断、シフト、スケーリング、反転といった基本操作が実現できて、さらにこれらを組み合わせて様々な操作が得られることを示している。また、これらの操作の成功確率を評価している。

第5章では、このようなテレポーテーションに基づく光子数状態の操作を実際に行うために、第4章で求めた成功確率とともに、光子検出器の量子効率 (光子の数え落とし) や暗計数 (数え過ぎ) による測定誤差の影響を考慮した有効性の評価を行っている。まず、光子検出器を表す確率演算子測度を用いて、光子数と位相差のベル測定器の量子理論的記述を与えている。そして、ベル測定の信頼度、もしくは測定したいベル状態以外のものが誤って検出される割合、および光子数状態操作の忠実

度（フィデリティー）、すなわち出力状態がどれくらい期待した操作になっているかを評価するための理論的定式化を行っている。さらに、これを適用して、キュービット（光子数0と1の重ね合わせ状態）とキュートリット（0, 1, 2の重ね合わせ状態）の操作と、状態操作を利用した光子数絡み合い状態の生成法について、量子効率や暗計数および入力状態とEPR源のパラメータを変数としたフィデリティーの数値的評価を与えている。この結果、提案した光子数状態操作が十分な精度で実現できることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、光子数状態を情報媒体とした量子情報処理・通信系構築をめざして、その切断や反転など様々な操作について理論的基礎研究を行い、その実現性を検討した結果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 2モードの光で光子数と位相差の同時固有状態となるベル状態を示し、位相演算子についての長年の議論に一つの明確な解答を与えている。そして、2つの真空スクィーズド状態のそれぞれ片方のモードを対として、光子数と位相差のベル状態の測定を行うことで、光子数と絡み合い状態（EPR源）を得る方法を見出している。さらに、この光子数・位相差ベル測定を実際に行うために、線形光学的方法、すなわちビームスプリッター、位相変調器および単一光子検出器を組み合わせた測定器を提案している。
2. 光子数とベル測定によるテレポーテーションの方法を用いて実現される光子数状態の操作について調べている。EPR源として、光子数差ゼロの真空スクィーズド状態および光子数とベル状態を用い、光子数とベル測定を行うことで、光子数状態の切断、シフト、スケールリング、反転といった基本操作が実現できて、さらにこれらを組み合わせて様々な操作が得られることを示している。そして、これらの操作の成功確率を評価している。
3. 実際の光子検出器では測定に誤差が出るが、その量子効率や暗計数を考慮して、光子数状態操作の有効性を評価している。光子検出器を表す確率演算子測定を用いて、光子数とベル測定器の量子力学的定式化を与えている。そして、これを用いて測定したいベル状態が実際に検出される効率、および光子数状態操作の忠実度、すなわち出力状態がどれくらい期待した操作になっているかについて評価を行っている。この結果、提案した光子数状態操作が十分な精度で実現できることを示している。

以上、本論文は、量子情報処理・通信系構築をめざして、光子数状態の操作とその線形光学的方法による実現について理論的研究を行い、その有効性を明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。