

氏名	なんぶよしひろ 南 部 芳 弘
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論工博第3894号
学位授与の日付	平成18年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	光学的手法による量子状態および量子状態操作の評価とその応用の研究

論文調査委員 (主査) 教授 山本克治 教授 福山 淳 教授 北野正雄

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、光学的手法に基づく量子情報技術の実験的研究、すなわち量子状態および量子状態操作の評価法と、その応用としての実用量子暗号システムの開発に関する結果をまとめたものであって、6章からなっている。

第1章は序論である。量子情報技術は、非局所相関などの量子力学に固有の性質を工学的に応用するものであり、その基礎となる量子情報理論について概説している。そして、この背景の下に、光学的手法による量子状態および量子状態操作の評価法と実用量子暗号システムの開発を行うという本論文の目的と意義について述べている。

第2章では、量子状態トモグラフィーによる2量子ビット状態の評価と量子相関状態生成プロセスの最適化について述べている。量子テレポーテーションなど、量子情報処理の光学の実証実験には偏光量子相関状態にある超短パルス光子対が多く用いられる。まず、このような量子相関光源を評価するための量子状態トモグラフィーについて理論的定式化を与えている。次に、パラメトリックダウンコンバージョンを利用した極短パルス光子対の偏光量子相関状態の生成について述べている。良質の偏光量子相関状態を得るためには偏光成分と時空成分の量子相関の解消が必要となる。このため、ポンプ光に偏光依存遅延素子を導入して偏光制御を行い、量子状態トモグラフィーにより2量子ビット状態を評価して、偏光量子相関光源生成の最適動作条件を見出している。また、従来の2光子偏光相関干渉実験も実施し、その結果が量子トモグラフィーによる評価結果とよく一致することを確認している。このことから、量子状態トモグラフィーによる量子状態評価技術の信頼性と有用性が実証されている。

第3章では、量子プロセストモグラフィーによる光学的量子ビット状態操作の評価について述べている。まず、1量子ビット状態操作の数学的表現である超演算子(超行列)と量子プロセストモグラフィーの原理について説明している。そして、光学素子を用いて種々の1量子ビットデコヒーレンスチャンネルを構成し、これらのチャンネルによる状態操作の評価実験を行っている。実験結果は予想と一致しており、量子プロセストモグラフィーの有効性および信頼性を光学的手法では初めて確認している。

第4章では、前章の1量子ビット状態操作の評価法を2量子ビット状態操作に対して拡張し、その評価に取り組んでいる。2量子ビット状態操作には条件付NOTゲートなど、量子情報技術において重要なものが多くある。したがって、これらの状態操作の評価および解析手法の確立は、今後のデバイス開発において極めて重要となる。まず、2量子ビット状態操作を示す超演算子とその行列表現を与え、2量子ビットの量子プロセストモグラフィーについて説明している。次に、実証実験では、2光子干渉と事後事象選択に基づくビームスプリッターを対象として選び、これによる2量子ビットの代表的な操作であるベル状態フィルターの評価を行っている。干渉系のふたつの光路に非対称性を導入することにより制御可能なデコヒーレンスを取り入れ、状態操作のデコヒーレンス依存性を調べることにより、ベル状態フィルターの表現行列の評価を行っている。そして、この結果が2つの主要なクラウス演算子の和により再現されることを示し、一般に信じられているような一重項フィルターとしては機能していないことを明らかにしている。このことは、量子状態操作の評価技術の実用的重要性を実証するものである。また、ビームスプリッターにおけるパリティ反転効果に着目し、このフィルター操作の理論的モデ

ルを与え、実験結果をよく再現することに成功している。

第5章では、実用量子暗号システムの開発について述べている。量子暗号システムは正規送信者と正規受信者間の一種の量子チャンネルであり、盗聴行為は伝送される1量子ビットに対する量子状態操作とみなせる。そして、量子暗号プロトコルはこの盗聴による状態操作を評価することに値する。したがって、量子暗号システムの開発は、これまでの章で実証された光学的手法による量子状態および量子状態操作の評価技術の光通信への応用といえる。本論文では、従来のプラグアンドプレイシステムを越えた一方向量子暗号システムの実用化をめざしている。このためには干渉系の安定化が重要となるので、平面光回路技術を用いて作製した光干渉システムを採用している。そして、150 km 長距離単一光子干渉実験を行い、満足できる干渉システムの安定性を示している。さらに、この干渉システムを用いて BB84 鍵配布システムを構築し、100 km を超える鍵伝送を実証している。

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、今後の課題と展開について述べている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、光学的手法による量子情報技術の実験的研究、すなわち量子状態および量子状態操作の評価法と、その応用としての実用量子暗号システムの開発に関する結果を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. 量子情報技術においては信頼性の高い量子相関光源とその評価技術が必要とされる。そのため、パラメトリックダウンコンバージョンを利用した超短パルス偏光量子相関光源の開発を行っている。良質の偏光量子相関を得るためには偏光成分と時空成分の量子相関の解消が必要となる。このため、偏光依存遅延素子による偏光制御を行い、量子状態トモグラフィーによる状態評価から量子相関光源生成の最適動作条件を見出している。また、状態評価の結果は2光子偏光干渉信号とよく一致し、評価技術の信頼性も確認できている。
2. 量子状態操作とその評価も量子情報技術においては重要である。まず、1量子ビット状態操作を示す超演算子の表現行列を与え、量子プロセストモグラフィーの原理を示している。そして、光学素子を用いた種々のデコヒーレンスチャンネルによる状態操作に対して、量子プロセストモグラフィーを用いた評価実験を光学的手法では初めて行い、信頼性の高い結果を得ている。
3. この評価法を2量子ビット状態操作の評価に拡張し、線形光学素子により実現できる代表的な操作であるベル状態フィルターに適用している。デコヒーレンスパラメータを制御することによりベル状態フィルターの表現行列の評価を行っている。そして、実験結果が2つの主要なクラウス演算子の和により再現されることを示し、一般に信じられているような一重項フィルターとしては機能していないことを明らかにしている。このことは、量子状態操作の評価技術の実用的重要性を実証するものである。また、ビームスプリッターにおけるパリティ反転効果に着目し、このフィルター操作の理論的モデルを与え、実験結果をよく再現することに成功している。
4. 以上の量子状態および量子状態操作評価技術の応用研究として、実用量子暗号システムの開発と実証実験を行っている。量子暗号プロトコルは盗聴による状態操作を評価することに値する。従来のプラグアンドプレイシステムを越えた一方向量子暗号システムの実用化をめざしており、この目的のために平面光回路技術を応用した光干渉システムを考案し、その作製を行っている。そして、150 km 長距離単一光子干渉実験を行い、満足できる干渉システムの安定性を示している。さらに、この干渉システムを用いて BB84 鍵配布システムを構築し、100 km を超える鍵伝送を実証している。

以上、本論文は、光学的手法による量子状態および量子状態操作の評価技術の実証と、その応用としての実用量子暗号システムの開発を行ったものであり、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18年2月1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。