

パラメトリック下方変換を用いた光子状態の制御と測定

学位論文内容の要旨

近年、量子力学の原理を応用した量子情報処理の研究が盛んに行われている。これにより、これまでよりも安全な通信や高速な処理が可能となる。例えば、量子暗号では原理的に盗聴を検知することができるため、盗聴不可能な通信を可能とする。これは、「単一光子の偏光が、一回の測定では完全に決定することができない」という量子力学の原理を用いている。また、量子計算では、量子力学の重ね合わせの原理を用いることで、超並列的な計算が可能である。そのため、原理的に古典計算よりも高速な計算を可能とするアルゴリズムが存在する。光子は、長距離伝送や、その状態の高精度検出も可能な事から、量子情報処理の担体として有力である。

しかし、その実現にあたっては、いくつか解決しなければならない問題がある。1 つには、光子を1 つずつ高い効率で一定時間ごとに射出するような単一光子源の実現である。近年盛んに研究されているが、実際の射出部で光子が1 つ得られる確率は0.1 程度でしかない。2 つ目に、一方の光子の状態に応じて他方の光子の状態を量子的に制御するゲート素子、制御ノットゲートの実現である。これまでの提案は、複雑な干渉計を組み合わせて1 つの素子を構成しており、安定動作が困難であった。また3 つ目には、2 光子干渉現象のより深い理解である。2 光子干渉は制御ノットゲートの動作の本質をなすが、光子に位相分散が重畳された場合については十分に研究されていなかった。

本研究では、それらの課題を解決するためのツールとして、パラメトリック下方変換に着目した。パラメトリック下方変換とは、非線形光学結晶中に入射されたポンプ光の光子が、その非線形性に応じ、エネルギー保存則を満たしながら2 つの光子へと変換される過程である。その際、発生する2 つの光子対は、発生時刻、波長（エネルギー）他様々な量子相関を持つ。本研究では、先に述べた課題を解決すべく、そのパラメトリック下方変換を用いた光子状態の制御と測定に関する研究を行った。

その結果、まず1 つ目の課題に関しては、発生した2 光子の一方を検出してもう一方の射出を制御することで、一定時間内に光子が1 つだけ含まれる単一光子源を実現、かつ、光子が1 つ含まれる確率を0.4 にまで高めることに成功した。2 つ目の課題に関しては、特殊な偏光依存性を有する部分偏光ビームスプリッタを用いることで、光

路干渉計の不要な制御ノットゲートの実証を、パラメトリック下方変換を利用した2光子源を用いて達成した。また3つ目の課題に関しては、パラメトリック下方変換で発生した光子対による2光子干渉について、初めて無限大の高次の効果まで取り込んだ解析を行った。さらに、2光子干渉の結果から位相分散を推定する方法を考案、実証することに成功した。

本論文は以下の9章で構成されている。

第1章では、まず、量子光学や量子情報処理と言った研究においてパラメトリック下方変換が用いられるようになった歴史的経緯を述べる。そして、本論文の目的と研究アプローチについて説明する。

第2章では、本論文で一貫して用いられているパラメトリック下方変換について概説する。特に、パラメトリック下方変換によって発生する光子対の発生パターンがどのようにして決定されるかを述べる。

第3章では、パラメトリック下方変換を用いた単一光子源の構築について報告する。単一光子源として性能を高くするためのどのような工夫を行ったかを述べる。

第4章では、単一光子源の出力状態の光子数分布について報告する。単一光子源の正確な評価を行うためには、出力状態の光子数分布を得る必要がある。そこで、まず、検出系の影響を補正する方法を述べる。次に、得られた光子数分布が何故そのような分布になったかの詳細な解析について報告する。

第5章では、狭帯域フィルタの位相分散がパラメトリック下方変換を利用した2光子干渉に与える影響について解析する。また、無限に高次の位相分散を持った場合2光子干渉がどのような影響を受けるかを検証する。

第6章では、パラメトリック下方変換を利用した2光子干渉結果から位相分散を測定する方法について報告する。まず、理論的に2光子干渉結果から、位相分散の導出を試みる。次に、実験的な実証を示す。

第7章では、これまでより安定な制御ノットゲートの構築について報告する。偏光ごとに反射率の異なる特殊な偏光ビームスプリッタを用いて、光路干渉を必要としない安定な制御ノットゲートの構築について述べる。

第8章では、高効率な方法を用いた制御ノットゲートの評価について報告する。制御ノットゲートを評価するにはその量子的な性質まで含めた評価が必要となる。これまでは、量子プロセストモグラフィーと呼ばれる方法が用いられてきた。しかしこの方法では256もの測定セットアップが必要となる。そこで、この章では、32の測定セットアップですむ方法を用いた評価を行う。

第9章では、以上の結果について総括を行う。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笹 木 敬 司
副 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 武 藤 俊 一
副 査 助 教 授 竹 内 繁 樹

学 位 論 文 題 名

パラメトリック下方変換を用いた光子状態の制御と測定

近年、量子力学の原理を応用した量子情報処理の研究が盛んに行われている。これにより、これまでよりも安全な通信や高速な処理が可能となる。例えば、量子暗号では不確定性原理を用いることで盗聴を検知することができる。また、量子計算では、量子力学の重ね合わせの原理を用いることで、超並列的な計算が可能である。そのため、原理的に古典計算よりも高速な計算を可能とするアルゴリズムが存在する。光子は、長距離伝送や、その状態の高精度検出も可能なことから、量子情報処理の担体として有力である。

しかし、その実現にあたっては、いくつか解決しなければならない問題がある。1つには、光子を1つずつ高い効率で一定時間ごとに射出するような単一光子源の実現である。近年盛んに研究されているが、実際の射出部で光子が1つ得られる確率は0.1程度でしかない。2つ目に、一方の光子の状態に応じて他方の光子の状態を量子的に制御するゲート素子、制御ノットゲートの実現である。これまでの提案は、複雑な干渉計を組みあわせて1つの素子を構成しており、安定動作が困難であった。また3つ目には、2光子干渉現象のより深い理解である。2光子干渉は制御ノットゲートの動作の本質をなすが、光子に位相分散が重畳された場合については十分に研究されていなかった。

本研究では、それらの課題を解決するためのツールとして、パラメトリック下方変換に着目した。パラメトリック下方変換とは、非線形光学結晶中に入射されたポンプ光の光子が、その非線形性に応じ、エネルギー保存則を満たしながら2つの光子へと変換される過程である。その際、発生する2つの光子対は、発生時刻、波長といった様々な量子相関を持つ。本研究では、先に述べた課題を解決すべく、そのパラメトリック下方変換を用いた光子状態の制御と測定に関する研究を行った。

その結果、まず1つ目の課題に関しては、発生した2光子の一方を検出してもう一方の射出を制御することで、一定時間内に光子が1つだけ含まれる単一光子源を実現、かつ、光子が1つ含まれる確率を0.4にまで高めることに成功した。2つ目の課題に関しては、特殊な偏光依存性を有する部分偏光ビームスプリッタを用いることで、光路干渉計の不要な制御ノットゲートの実証を、パラメトリック下方変換を利用した2光子源を用いて達成した。また3つ目の課題に関しては、パラメトリック下方変換で発生した光子対による2光子干渉について、初めて無限大の高次の効果まで取り込ん

だ解析を行った。さらに、2光子干渉の結果から位相分散を推定する方法を考案、実証することに成功した。

本論文は以下の9章で構成されている。

第1章では、まず、量子光学や量子情報処理と言った研究においてパラメトリック下方変換が用いられるようになった歴史的経緯を述べる。そして、本論文の目的と研究アプローチについて説明する。

第2章では、本論文で一貫して用いられているパラメトリック下方変換について概説する。特に、パラメトリック下方変換によって発生する光子対の発生パターンがどのようにして決定されるかを述べる。

第3章では、パラメトリック下方変換を用いた単一光子源の構築について、報告する。

第4章では、単一光子源の出力状態の光子数分布の解析について報告する。まず、検出系の影響を補正することで、出力状態の正確な光子数分布を得る。次に、得られた光子数分布が何故そのような分布になったかの詳細な解析について報告する。

第5章では、狭帯域フィルタの位相分散がパラメトリック下方変換を利用した2光子干渉に与える影響について解析する。また、無限に高次の位相分散を持った場合2光子干渉がどのような影響を受けるかを検証する。

第6章では、パラメトリック下方変換を利用した2光子干渉結果から位相分散を測定する方法について報告する。まず、理論的に2光子干渉結果から、位相分散の導出を試みる。次に、実験的な実証を示す。

第7章では、これまでより安定な制御ノットゲートの構築について報告する。偏光ごとに反射率の異なる特殊な偏光ビームスプリッタを用いて、光路干渉を必要としない安定な制御ノットゲートの構築について述べる。

第8章では、高効率な方法を用いた制御ノットゲートの評価について報告する。この章では、これまでの256の測定セットアップが必要な方法に対し、32の測定セットアップですむ新しい方法を用いて評価を行う。

第9章では、以上の結果について総括を行う。

これを要するに、著者は、パラメトリック下方変換から発生する光子対を用いることで、高効率な単一光子源、コンパクトな制御ノットゲート、2光子干渉における位相分散の研究を行い、有益な知見を示し、光量子情報処理の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。