

多光子量子干渉を用いた光量子回路の実現と その計測への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、量子力学の基本的な性質を、直接情報通信や情報処理に応用する量子情報科学の研究が急速に進展している。そのアプリケーションとして、特定の問題を圧倒的に高速に解ける量子コンピュータや、不確定性原理により盗聴を排除可能な量子暗号などがある。その量子情報の担い手としては様々な物理系が考えられる。その中でも光の素粒子である光子は、単一の量子の状態検出が比較的容易であること、量子重ね合わせ状態が壊れにくいこと、長距離伝送が可能なこと、そして一つの量子ビット (光子) に対するゲート操作が既存の光学部品で実現できることなどの特長があり、有力な担体である。光子を用いた量子情報処理の一つの方法として、波長板やビームスプリッタなどの線形光学素子を利用する方法がある。この方法では、ビームスプリッタにおける光子の量子干渉が重要な役割を果たす。本研究では、このような光子の量子干渉を利用した光量子回路の実現およびその応用に関して研究を行った。

光量子回路の実現では、回路の構築と共に、ある特定の入力光子状態の生成が非常に重要である。本研究ではまず、量子干渉を利用し、2つの光子が同一のモードに存在していることを検証する方法を提案、実証した。この方法では、ビームスプリッタに入射された光子の数は同じであっても、状態のモード同一度によって異なる量子干渉が生じ、その結果異なる出力が得られることを利用した。また、本方法を用い、パラメトリック下方変換を用いた光子対源により生成した状態について、これが「1組の2光子フォック状態対」であるか、または「2組の1光子フォック状態対」であるかを判別する実験を行った。その結果は、2光子フォック状態対に対する理論値と良い一致を示し、光源が「2光子フォック状態対」を生成していることを確認できた。

続いて、この2光子フォック状態対を入力とする光量子回路を構築し、それを用いた量子計測に関する研究を行った。この光量子回路は、変型サニャック構造を用いてコンパクトに実装、長時間安定性を実現した。この回路に2光子フォック状態対を入力することで、経路と光子数のもつれ合い状態を生成した。実験の結果、4光子干渉による干渉縞は、単一光子に対して4分の1の周期を示し、また干渉縞の明瞭度も92%と高い値を得た。これは、この4光子干渉計が、レーザーを利用した場合の位相測定感度限界 (標準量子限界) よりも高い感度を実現できることを示す結果である。

ところで、光量子回路の規模が増大すると、必要となるゲート数が増加、調整の複雑化や、回路サイズの増大といった問題が生じる。これらの問題を解決する方法として、光子列をゲート素子に繰り返し入射しながら処理を行う方法を提案した。本研究において、この方法により任意の量子回路を実現可能であることを示し、また具体的に、多光子もつれ合い状態を生成するための光量子回路を提案した。

しかし一般に光量子回路では、前段のゲートで生じたエラーが後のゲートへ伝搬、蓄積されるため、その規模が大きくなるほど最終的な出力の信頼度が低くなってしまう。この問題を解決するためには、個々のゲートにおけるエラーを減少させる必要がある。本研究では、2光子の量子干渉に基づいた制御ノットゲートのエラー解析を行った。本研究では、特に、(1)2光子干渉や光学部品の各種不完全性に起因するエラーの重大さ、(2)それらの相乗・相殺効果に着目した。その結果、2光子干渉の不完全さ(モードミスマッチ)及びモード間のクロストークがより重大であること、また、相殺効果は条件によりエラーの10%にも達することが初めて明らかとなった。

以上を要するに、本研究では、多光子量子干渉を用いた光量子回路の実現およびそれを用いた量子計測に関する研究を行い、入力状態として必要な2光子フォック状態対の検証方法を提案・実証、また、その状態を用いて4光子もつれ合い状態の干渉を高精度で実現、その結果、従来の位相測定感度の限界を超えうることを示した。また、より大規模な光量子回路の実現方法としてゲートの再帰利用法を提案すると共に、光量子ゲートのエラーの原因のうち重大要因の特定や要因間の相乗効果を初めて定量的に特定した。これらは、光子を利用した量子情報技術の進展に大きく貢献する物である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 竹 内 繁 樹

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 笹 木 敬 司

学 位 論 文 題 名

多光子量子干渉を用いた光量子回路の実現と その計測への応用に関する研究

近年、量子力学の基本的な性質を、直接情報通信や情報処理に応用する量子情報科学の研究が急速に進展している。そのアプリケーションとして、特定の問題を圧倒的に高速に解ける量子コンピュータや、不確定性原理により盗聴を排除可能な量子暗号などがある。その量子情報の担い手としては様々な物理系が考えられる。その中でも光の素粒子である光子は、単一の量子の状態検出が比較的容易であること、量子重ね合わせ状態が壊れにくいこと、長距離伝送が可能なことなどの特長があり、有力な担体である。光子を用いた量子情報処理の一つの方法として、波長板やビームスプリッタなどの線形光学素子を利用する方法がある。この方法では、光子の量子干渉が重要な役割を果たす。本論文は、このような光子の量子干渉を利用した光量子回路の実現およびその応用に関して研究したものである。

光量子回路の実現では、回路の構築と共に、ある特定の入力光子状態の生成が重要である。本論文ではまず、量子干渉を利用し、パラメトリック下方変換を用いた光子対源により生成した状態について、これが「1組の2光子フォック状態対」であるか、または「2組の1光子フォック状態対」であるかを判別する方法を初めて提案、検証している。その結果は、2光子フォック状態対に対する理論値と良い一致を示し、光源が「2光子フォック状態対」を生成していることを確認している。

続いて、この2光子フォック状態対を入力とする光量子回路を構築し、それを用いた量子計測に関する研究を行っている。この光量子回路は、変型サニャック構造を用いてコンパクトに実装、長時間安定性を実現、さらにこの回路に2光子フォック状態対を入力することで、経路と光子数のもつれ合い状態の生成に成功している。実験の結果、4光子干渉による干渉縞は、単一光子に対して4分の1の周期を示し、また干渉縞の明瞭度も92%と高い値を得ており、これは、この4光子干渉計が、レーザーを利用した場合の位相測定感度限界(標準量子限界)よりも高い感度を実現できることを示す結果である。これら2つの成果は一つの論文としてScience誌に掲載されている。

また、一般に光量子回路では、前段のゲートで生じたエラーが後のゲートへ伝搬、蓄積されるため、その規模が大きくなるほど最終的な出力の信頼度が低くなってしまう。この問題を解決するためには、個々のゲートにおけるエラーを減少させる必要がある。本論文では、2光子の量子干渉に基づいた制御ノットゲートのエラー解析を行っている。その結果、2光子干渉の不完全さ(モードミスマッチ)及びモード間のクロストークが特に重大なエラー要因であること、また、相殺

効果は条件によりエラーの 10% にも達することが初めて明らかにしている。この結果は、SPIE, CLEO-Europe/IQEC 他の国際会議論文として出版されている。

以上を要するに、本論文では、多光子量子干渉を用いた光量子回路の実現およびそれを用いた量子計測に関する研究を行い、入力状態として必要な 2 光子フォック状態対の検証方法を提案・実証、また、その状態を用いて 4 光子もつれ合い状態の干渉を高精度で実現、その結果、従来の位相測定感度の限界を超えうることを示している。また、より大規模な光量子回路の実現方法としてゲートの再帰利用法を提案すると共に、光量子ゲートのエラーの原因のうち重大要因の特定や要因間の相乗効果を初めて定量的に特定している。これらの研究成果は、光子を利用した量子情報技術の進展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 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。