

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 橋本 洋輔

現在、量子計算機が注目を集めている。これは量子力学の原理を利用した全く新しい原理の計算機であり、これまでの古典演算を劇的に省エネで行えるのみならず、巡回セールスマン問題や巨大数の素因数分解といった、現代のスーパーコンピュータでも解くのに莫大な時間がかかる問題を高速に解ける可能性を持っている。量子計算機で実用的な計算を行うには構成要素として量子メモリを持つ必要がある。光を用いた量子計算機では光の量子状態を保存できるメモリが必要で、これまでに連結共振器を用いた量子メモリの開発を行ってきた。これは保存できる光の波長が任意で、通信波長帯にも適用できる長所がある。しかし位相リファレンスが導入されていないため、任意の量子状態を取り扱うことができず、量子ゲートへ適用するには不十分であった。

本研究では、連結共振器型量子メモリに位相リファレンスとしてプローブ光を導入し、任意の量子状態への拡張を目指した。量子メモリの動作の検証は、メモリから放出されるアイドラー光子に弱いコヒーレント光を合波してメモリ内に位相敏感な光子数重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ を生成して保存し、取り出すことを行った。取り出した量子状態の評価をホモダイントモグラフィによって行い、Wigner 関数が位相平面上で回転対称にならず状態が位相敏感であること、Wigner 関数の負値が原点以外にあること、密度行列に重ね合わせ状態特有の非対角項があることを確認し、連結共振器型量子メモリが原理的に任意の量子状態を保存できることを示した。

また、開発した連結共振器型量子メモリを応用し、2台の量子メモリ間のエンタングルメントの生成実験を行った。これはそれぞれのメモリから放出されるアイドラー光子を50:50ビームスプリッターで合波することにより、空間的に離れた2つのメモリ間にエンタングルメントを生成するもので、量子中継器への応用が期待される。生成した状態の評価は2モードホモダイントモグラフィによって行い、推定した密度行列にエンタングルド状態特有の非対角項があることを確認した。

本論文は以下の9章より構成される。以下に各章の内容を要約する。

第1章では序論として、本研究の背景および目的について述べ、本研究で行った実験の概要を述べている。さらに、本論文の構成について述べている。

第2章では本研究の理解に必要な量子光学の基礎事項について、理論的な側面から述べている。

第3章では本研究で行った実験に必要な光学実験技術について詳細に説明している。

第4章では量子状態を生成する方法、および本研究で用いた連結共振器によってそれを保存し取り出す方法について、理論的な側面から述べている。まず状態生成の基本となる非縮退パラメトリック下方変換を用いた2モードスクイーズド真空状態の生成過程について述べ、これに射影測定を施して任意の量子状態を生成する方法について説明している。そして、連結共振器系の緩和過程を古典、量子双方のモデルによって解析し、連結共振器型量子メモリが量子状態を保存し、任意のタイミングで取り出せるメカニズムについて説明している。

第5章では光子数重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ の保存と取り出し実験について、実験の概要と実験系の詳細を述べている。特に本研究で新たに導入した位相リファレンスとしてのプローブ光およびそれを用いた干渉計相対位相のロックについて詳しく述べられている。

第6章では光子数重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ の保存と取り出し実験の実験結果を示し、得られた結果について考察を行っている。重ね合わせ係数の異なる3つの状態において、それぞれ0から400 nsまで5種類の保存時間ごとに直交位相振幅の分布、密度行列、Wigner関数を示し、位相敏感な量子状態を連結共振器型量子メモリによって保存および取り出すことに成功したことが示されている。

第7章では2台の量子メモリ間のエンタングルメント生成実験について、実験の概要と実験系の詳細を述べている。ビームスプリッターと光子検出によってエンタングルメントスワッピングが行われ、空間的に離れた2台のメモリ間にエンタングルメントが生成される様子が記述されている。

第8章では2台の量子メモリ間のエンタングルメントの生成実験の実験結果を示し、得られた結果について考察を行っている。直交位相振幅の同時分布に特徴的なパターンが現れ、また密度行列にエンタングルド状態に特徴的な非対角項が現れており、2台の量子メモリ間にエンタングルメントを生成できたことが示されている。

第9章では本研究の結論および今後の展望を述べている。

以上のように、本研究では連結共振器型量子メモリに位相リファレンスとしてプローブ光を導入することで、任意の量子状態を取り扱える量子メモリを開発した。量子メモリの動作の検証はメモリ内に位相敏感な光子数重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ を生成して保存し、取り出すことで行い、これに成功した。また、この連結共振器型量子メモリの応用実験として、2台の量子メモリ間のエンタングルメントの生成実験を行い、これに成功した。したがって本研究の成果は、光を用いた量子計算機を実現する上で、重要な意義があるものと認められる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。