

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 河野 信吾

本論文は「Quantum Measurement of Itinerant Microwave Photons Using Superconducting Circuits (超伝導回路を用いた伝搬マイクロ波光子の量子測定)」と題し、超伝導量子回路を用いた量子制御・観測技術の発展に対する寄与および量子ネットワークや量子センシングへの応用が期待される、伝搬マイクロ波光子を対象とした量子測定に関する研究成果をまとめたものである。伝搬モード上のマイクロ波光子状態について、非古典的な光子数分布の観測・量子状態トモグラフィ・量子非破壊検出の3つの実験結果が報告されている。

大規模量子計算に向けた超伝導量子ビットの集積化において、伝搬マイクロ波光子を媒体とした量子ネットワーク技術の構築は重要な要素である。共振器量子電磁気学の超伝導量子回路への展開を背景として、共振器内に閉じ込められたマイクロ波光子に対する量子技術が急速に発展を遂げている一方、導波路上を伝搬するマイクロ波光子に対する量子制御・観測は未だに挑戦的な課題である。そのひとつの理由として、マイクロ波光子のエネルギーが可視光領域のそれと比較して4~5桁程度小さいために既存の光子検出技術が適用できず、量子技術の基盤となる量子測定が未だに困難であるという点が挙げられる。

本論文では、超伝導量子ビットと共振器モードが結合した系に対し、入出力理論に基づいて共振器モードと導波路モードとの結合も取り入れ、伝搬マイクロ波光子と超伝導量子ビットの間の共振器モードを介した相互作用を記述している。さらに超伝導量子ビットを用いた伝搬モード上のマイクロ波光子状態の量子測定を実現している。トランズモン量子ビットと呼ばれるタイプの超伝導量子ビットと3次元マイクロ波空洞共振器が非共鳴的に結合する系を用いて、以下の3つの実験を行なっている。

1つめの実験では、共振器内の光子数に応じて離散的な共鳴周波数シフトを受ける超伝導量子ビットの励起スペクトルを観測することにより、外部伝搬モードを通じて共振器に入力されたスクイズド真空状態の光子数分布を決定している。さらに「Klyshkoの判定法」を用いて、得られた光子数分布が非古典的状态に対応することを示している。

2つめの実験では、ジョセフソンパラメトリック増幅器（以下、JPA）を位相敏感増幅器として動作させることにより、伝搬マイクロ波モードのウィグナー量子状態トモグラフィを実現している。位相敏感パラメトリック増幅により信号の特定の位相成分のみを増幅して、量子雑音の寄与を排除するとともに後段で混入する電気雑音の影響を実効的に抑制し、直交位相振幅に対する高効率な量子測定を実現している。その際、超伝導量子ビットの位相緩和測定に基づいて振幅を較正した伝搬マイクロ波モード上のコヒーレント状態を入力に用いて、直交位相振幅の測定効率を高精度に評価している。さらに上記の測定を多くの異なる位相成分に対して行うことにより、測定効率による影響を補正したウィグナー量子状態トモグラフィを高い信頼性のもとで行うこと可能にし、伝搬マイクロ波モードの量子

状態の評価を実現している。

3つめの実験では、共振器モードを介した伝搬マイクロ波光子と超伝導量子ビットとの間の非共鳴的な相互作用を用いて、超伝導量子ビットをプローブとした伝搬マイクロ波光子に対する量子非破壊測定を実証している。入力状態として弱コヒーレント状態を用いて、伝搬マイクロ波光子検出の量子効率および暗計数確率を評価し、さらにウィグナー量子状態トモグラフィを用いて量子非破壊性の検証を行っている。また、量子非破壊検出に用いている伝搬マイクロ波光子と超伝導量子ビットの相互作用は、両者の間の2量子ビットゲートとしても機能することが示されている。

本論文は全10章からなる。以下に各章の内容を要約する。

まず第1章では、導入として、超伝導量子回路の量子光学分野および量子情報処理分野における位置づけが説明されている。また、先行研究と比較しながら、本研究の位置付けと意義について述べられている。

次に第2章では、超伝導回路を量子力学的に取り扱うための理論的手法が説明されている。本研究の実験結果を説明するために必要なモデルが説明されている。

第3章では、超伝導量子ビットとマイクロ波モードの量子状態の表現方法および制御方法が説明されている。また、伝搬モードの直交位相振幅測定の量子力学的な扱い方について説明されている。

第4章では、電磁界シミュレータを用いた超伝導量子回路の設計手法が述べられている。実験結果と比較しながら、設計の妥当性を議論している。

第5章では、本論文で用いた実験系が説明され、超伝導量子回路の制御・測定に要求される性能を満たしているかが議論されている。

第6章では、種々の超伝導量子回路の基本的な評価方法とその結果が説明されている。

第7章では、超伝導量子ビットの励起スペクトルを用いたマイクロ波スクイズド真空状態の光子数分布測定に関する実験およびその結果について説明している。

第8章では、JPAを用いた伝搬マイクロ波モードのウィグナー量子状態トモグラフィに関する実験およびその結果について述べている。

第9章では、伝搬マイクロ波光子と超伝導量子ビットとの間の相互作用を用いた伝搬マイクロ波光子に対する量子非破壊測定に関する実験およびその結果が議論されている。

最後に第10章では、本論文の結論と今後の展望を述べている。

これらの成果は、伝搬マイクロ波モード上の量子状態に対する高精度な測定を実現したものであり、マイクロ波領域における量子ネットワークや量子センシングのための基盤技術として大きく寄与するものである。同時に、超伝導量子ビットと伝搬マイクロ波光子の相互作用を用いた新たな量子測定手法は、関連するエネルギースケールにおける様々な物理系に対する量子測定技術の開発に大きく貢献する成果である。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。