

論文の内容の要旨

論文題目

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)

氏 名 河野 信吾

本論文は、超伝導回路の制御・測定技術を用いた、伝搬マイクロ波光子の量子測定に関する研究成果をまとめたものである。

近年、量子誤り耐性のある論理量子ビットの実現に向けて、超伝導量子ビットの集積化に関する研究が急速に推し進められている。しかしながら、超伝導量子ビット間のクロストークや配線の複雑化等、論理量子ビットに必要な数の超伝導量子ビットを集積化するにあたっては多くの課題が残されている。それらの問題を解決するための一つのアプローチとして、伝搬光子を媒介として離れた量子ビット間をつなぐ量子ネットワークの構築が提案されている。それに向けた研究は、高感度な光子検出器を基盤技術として、主に可視光および通信波長帯において盛んに行われている。一方、超伝導量子ビットの励起周波数に相当するマイクロ波領域においては未だに未成熟な研究テーマである。なぜなら、マイクロ波光子のエネルギーは可視光領域のそれと比較して4~5桁程度小さいため、既存の光子技術が適用できず、マイクロ波光子の量子測定が依然として困難なためである。超伝導量子ビットの高い制御技術を用いて、量子ネットワークの要素技術の一つとされている伝搬光子生成技術は着実に進展しているにもかかわらず、伝搬マイク

ロ波光子に対する信頼性のある評価手法は依然として確立されていない。今後、より高精度な量子ネットワークを構築するにあたって、伝搬マイクロ波光子の量子測定技術も同様に高めていく必要がある。先行研究として、共振器中に閉じ込められたマイクロ波光子と超伝導量子ビットとの相互作用の高い制御技術を用いた、共振器内マイクロ波光子の量子測定技術は多く報告されている。一方、時間モード整合等の問題により、伝搬マイクロ波光子と超伝導量子ビットとの相互作用を効率よく誘起することに課題が残されているため、共振器内光子に対する量子測定技術をそのまま転用することが困難である。

そこで本論文では、超伝導回路を用いた伝搬マイクロ波光子の量子測定に関する研究を行った。実験には、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た。本研究における主な着眼点は、超伝導量子ビットと共振器内マイクロ波光子の相互作用を入出力理論に基づき拡張して、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相互作用を用いたことである。具体的には、伝搬マイクロ波光子の量子測定に関する以下の3つの実験を行なった。1つめは、超伝導量子ビットの励起スペクトルを用いて、マイクロ波スクイズド真空状態の光子数分布を測定し、その非古典性を実証した実験である。共振器内の光子数に応じた離散的な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測定した。さらに「Klyshkoの判定」を用いて、得られた光子数分布が非古典であることを示した。2つめは、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る、伝搬マイクロ波光子のウィグナー量子状態トモグラフィの実験である。信号の位相敏感増幅により、量子雑音の寄与を排除するとともに、その後に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が実現できる。その際、超伝導量子ビットの位相緩和測定に基づいて較正された伝搬マイクロ波のコヒーレント状態を用いて、直交位相振幅の測定効率を高精度に評価した。それにより、測定効率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ができ、極低温下での伝搬マイクロ波光子の評価を可能にした。3つめは、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た実験である。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た。

最後に本論文の構成について述べる。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を説明する。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も説明する。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を説明する。本研究の実験結果を説明するために必要なモデルはここで説明される。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を説明する。第4章では、電磁界シミュレータを用いた超伝導回路の設計手法を述べる。第5章では、本論文で用いた実験系の説明を行う。第6章では、種々の超伝導量子回路の基本的な評価方法を説明する。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ついての実験およびその結果について説明する。第8章では、JPAを用いた伝搬マイクロ波光子のウィグナー量子状態トモグラフィーについての実験およびその結果について述べる。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ついての実験およびその結果について議論する。最後に第10章では、本論文の結論と今後の展望をまとめる。