

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 太田健介

次世代の超並列計算機として期待される量子コンピュータが注目を集めている。その中で集積化が容易な固体素子である超伝導量子ビットは有力な候補として挙げられる。しかし、これまでに研究されている超伝導量子ビットは従来超伝導体で作製されているため、極低温環境が必要であり、実用化に大きな障害となる。一方エネルギースケールが大きい高温超伝導体で形成される、固有ジョセフソン接合を量子ビットに用いることができればより高温で動作可能だと考えられる。

本論文は固有ジョセフソン接合を量子ビットへ応用可能かどうかを調べることを目的とし、その位相ダイナミクスについての研究を報告している。

第1章は、研究の背景、及び研究の目的についての記述である。ジョセフソン接合についての概説と、ジョセフソン接合を記述する位相空間中のポテンシャル井戸からの脱出レートについて記述されている。そして、本研究の対象である高温超伝導体、及び固有ジョセフソン接合について説明され、近年の他の研究グループによる固有ジョセフソン接合の脱出レートの研究が報告されている。最後に、研究の動機をまとめ目的が記述されている。

第2章は、試料の作製方法、加工方法、及び測定方法についての記述である。高温超伝導体の結晶構造自体が形成する固有ジョセフソン接合を測定するため微細に加工する方法が記されている。本論文では素子構造を比較するためにS字型に加工した素子とメサ型に加工した素子の二つが作製されたので、それぞれについて加工方法が記されている。測定方法は脱出レートの測定方法について述べられた後、自作した測定用クライオスタットを含む測定系について記述されている。特に外来ノイズの除去の方法、 ^3He を用いた0.4 Kまでの低温環境の構築について詳細に述べられている。

第3章は、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合についての実験結果と考察の記述である。固有ジョセフソン接合は多数の接合が直列に連なっているが、ゼロボルト状態から第一電圧ブランチへの第一スイッチングと第一電圧ブランチから第二電圧ブランチへの第二スイッチングについて、S字型試料、及びメサ型試料において系統的に測定した結果が述べられている。そして、第一スイッチングにおいて、素子構造によらず1 K以下の低温で脱出レートが温度に依存しない振る舞いを示し、熱活性(TA)から巨視的量子トンネリング(MQT)へのクロスオーバー温度とほぼ一致することから、MQTの観測に成功したと報告している。また、最低温においてマイクロ波を照射し、離散化量子準位の観測も成功したことを記している。第二スイッチングは第一スイッチングと定性的には同様の振る舞いを観測したが、

脱出レートが温度に依存しなくなる温度 $T_s^{\text{第二}}$ が約 10 K と、第一スイッチングの時より高温で、かつ見積もられるクロスオーバー温度よりも高温であることが記述されている。第一スイッチングが電圧状態になったことによりヒーティングの可能性が考えられるが、 $T_s^{\text{第二}}$ が素子構造によらないこと、そしてパルス幅を変えても脱出レートが変わらないことからヒーティングの寄与は無視できる程度であるという明確な結論を述べている。また、準粒子注入による温度上昇の可能性についても定量的な見積もりを行い、その可能性が低いことを示している。最後に MQT の可能性を考察し、それを確かめるためには THz 波を照射した離散化量子準位の観測を行う必要があるという提案がされている。また、脱出過程が MQT だとするとクロスオーバー温度の見積もりとの不一致は接合間の相互作用によるものだと考察されている。

第 4 章は、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 固有ジョセフソン接合についての実験結果と考察の記述である。 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜から作製した固有ジョセフソン接合は Grain Boundary の影響により Overdamped 接合になってしまい、脱出レートの測定に適さないことが明らかされた。 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 単結晶から作製した固有ジョセフソン接合において脱出レートの測定を行い、定性的には $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合の第一スイッチングと同様の振る舞いを観測されたことを述べている。しかし、TA 領域、MQT 領域ともに計算値と一致しないことを記している。そして、この不一致は接合間の相互作用によるもので、Bi 系に比べ接合間相互作用が強い La 系で顕著に現れたと考察されている。

第 5 章は本論文のまとめ、及び今後の展望の記述である。第 3 章、第 4 章で得られた結果と考察をまとめ、固有ジョセフソン接合における脱出レートの研究についての今後の展望が述べられている。

以上まとめると、本論文では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合については脱出レートを異なる素子構造について比較し、第一スイッチングに対しては素子構造によらず MQT の観測に成功し、第二スイッチングについてはジュール・ヒーティングの寄与が無視できる程度であるという新しい結論を得ている。また、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 固有ジョセフソン接合についても同様の研究を行い接合間相互作用が重要であるという新たな提案もされており、評価できる内容である。

なお、本論文における研究成果は、本学大学院総合文化研究科の前田京剛氏、青山学院大学理工学部の北野晴久氏、京都大学工学研究科の鈴木実氏、濱田憲治氏、竹村亮太氏、大牧正幸氏、超電導工学研究所の田辺圭一氏、町敬人氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって遂行したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、本審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。