

氏 名 (本籍)	く ぼ ゆい まる 久 保 結 丸 (神奈川県)		
学位の種類	博 士 (工 学)		
学位記番号	博 甲 第 4928 号		
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	数理解物質科学研究科		
学位論文題目	固有ジョセフソン接合における巨視的量子現象の研究		
主 査	筑波大学教授	工学博士	熊 倉 浩 明
副 査	筑波大学教授	理学博士	大 塚 洋 一
副 査	筑波大学准教授	博士 (理学)	高 野 義 彦
副 査	筑波大学准教授	博士 (理学)	小 林 伸 彦
副 査	京都大学工学研究科准教授	博士 (理学)	掛 谷 一 弘

論 文 の 内 容 の 要 旨

巨大整数の素因数分解など場合の数一つ一つをしらみつぶしに調べる必要がある非多項式問題を現在のコンピュータは苦手としている。1994年にShorは、量子計算を用いることで、遙かに短時間で計算出来るアルゴリズムを考案した。量子計算は量子ビットを単位として行われ、量子ビットは量子力学的な2準位系で構成される。ジョセフソン接合を用いた位相量子ビットは有力な候補である。しかし、位相量子ビットはこれまでは極低温でしか実現されていなかった。位相量子ビットの動作原理、巨視的量子トンネリング (MQT) を高温で実現するためには、高いジョセフソンプラズマ振動数を持つジョセフソン接合を用意する必要がある。本研究では、プラズマ周波数の高く複数の接合が連なった銅酸化物高温超伝導体の結晶に内包されている固有ジョセフソン接合を用い、液体ヘリウム温度を上回る高温でMQTを実現することおよび固有ジョセフソン接合の特徴とする多接合の効果を明らかにすることを主な目的としている。

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) の固有ジョセフソン接合は、Te添加法で作製した単結晶ウイスキーを用いて取束イオンビーム (FIB) により微細加工した。得られた素子のスイッチング電流 I_{sw} の確率分布 P を、温度範囲 4.5 K - 0.4 K, $N = 20,000$ 及び $\Delta I = 20$ nA の条件で測定した。分布幅は温度の低下と共に狭くなっていることが明瞭に確認された。 I_{sw} の標準偏差 σ を測定温度に対してプロットした結果、実験結果は理論で予想されるとおり σ は $T^{2/3}$ 乗則に良く一致した。また、クロスオーバー温度は、約 270 mK と見積もられた。この BSCCO 固有ジョセフソン接合は、我々の測定システムの最低温度 0.4 K においてもまだ熱活性領域であるものと考えられる。この BSCCO 固有ジョセフソン接合に、熱活性領域で、マイクロ波を照射してスイッチング電流分布を測定した。その結果、熱活性領域でも量子化準位を反映したような振る舞いが観測された。測定した BSCCO のゼロバイアスのジョセフソンプラズマ振動数が 57.04 GHz であり、 I_c 近傍でそれが顕著に小さくなることは自明である。それにもかかわらず、入射マイクロ波周波数 55 GHz で共鳴が起きることが観測された。量子化準位間の遷移では、入射マイクロ波周波数 > プラズマ振動数の場合の共鳴は報告されていない。Gronbech-Jensen らのシミュレーション結果では、入射マイクロ波周波数がプラズマ振動数より

高いときにも、古典的共鳴が起こることを予想している。これは入射マイクロ波がポテンシャルを揺さぶり、ポテンシャルの振動と仮想粒子のプラズマ振動とが共鳴した結果、脱出確率が増幅されるとする古典的現象の強い証拠である。ジョセフソンプラズマ振動数より高い周波数のマイクロ波を入射して共鳴が起きたことより、BSCCOの固有ジョセフソン接合において観測された共鳴現象は、古典的な現象だと考えられる。逆に考えると、これは量子準位間の遷移と古典共鳴との判別方法の一つになり得る。このように、電流バイアスジョセフソン接合における巨視的量子現象の研究分野において、量子と古典との区別をいかにして行うか、といった問題は近年盛んに議論されている。この問題に対して解明方法を実験的に示すことに成功した。

プラズマ周波数の特に高いジョセフソン接合として銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) の固有ジョセフソン接合に注目した。LSCOの固有ジョセフソン接合は超伝導を担う CuO_2 層と絶縁体的な $\text{La}(\text{Sr})_2\text{O}_2$ 層で構成されており、c軸に電流を流すとその特性が現れる。しかし、LSCOは劈開性がないため微少素子の作製は難しく、FIBを用いた特殊な加工プロセスを考案し、LSCOの微小固有ジョセフソン素子を加工した。0.7 Kにおける電流電圧特性は、スイッチング電流値 I_{sw} での鋭い電圧ジャンプと明瞭なヒステリシスを示し、固有ジョセフソン効果を観測できた。電圧状態へのスイッチングは、ポテンシャルからの脱出に相当する。この脱出が熱活性か、或いはMQTかを実験的に決めるために、スイッチング電流値を各温度で繰り返し測定し、統計的な確率分布 $P(I_{sw})$ とその温度依存性を評価した。その結果、7 K で非常に広がっている分布が、5 K 以下ではほとんど変化せず、分布幅の温度依存性も 5.5 K 以下で温度依存しなくなり、約 5 K 以下でMQTが実現しているものと考えられる。このように、LSCOの固有ジョセフソン接合においてMQTを5 Kで実現することに成功した。5 Kは液体ヘリウム温度を上回っており、比較的容易に到達可能な低温である。このことは量子ビットの動作条件を著しく緩和出来る可能性を提案するものであり、極めて画期的な研究成果である。希釈冷凍機が不要なのでこの分野の研究が活発になることが予想され、パイオニア的な研究であるといえよう。また、光子が存在しない状態で脱出確率が増幅されることを見出した。この現象は、強結合の固有ジョセフソン接合が積層したときに予想される位相空間のポテンシャルモデルを使って定性的に説明できることを示した。

審査の結果の要旨

ジョセフソン接合を用いた位相量子ビットの研究は近年盛んになってきている。しかし、従来の金属超伝導体を用いたジョセフソン接合では、希釈冷凍機を用いなければ得られない極低温が不可欠であり、応用や研究の普及の妨げになっている。最近、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を用いた位相量子ビットの研究が注目を集めてきている。BSCCOの固有接合によるMQTの観測を発端に、ジョセフソン接合が積層する効果による脱出確率の増加など、高温超伝導体の固有接合を用いるメリットが示され始めている。このような状況の中、本博士論文は、BSCCO固有接合における量子と古典の区別の方法を実験的に初めて示すと共に、LSCO固有接合のクロスオーバー温度が液体ヘリウム温度を上回る5 Kに達することを示すなど大変インパクトの高い内容である。前半のBSCCO固有接合における量子と古典の区別は、現在、位相量子ビットの研究者の間で大変話題となっているテーマであり、これまでに理論的な予想はあったものの実験的に量子と古典を区別する結果を示したのは世界で初めてのことであり、大変興味深い研究成果である。後半のLSCO固有ジョセフソン接合におけるMQTの研究は、プラズマ周波数が高く、多接合で強結合の固有ジョセフソン接合がクロスオーバー温度を上昇させることに有利であることを具体的に示す興味深い成果である。そして、実験的にクロスオーバー温度が5 Kに達することを示すことに成功し、液体ヘリウムで容易に到達できる低温で量子ビットが実現可能であることを示唆する大変優れた研究成果である。

よって、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。