

平成21年 5月21日現在

研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2006~2008
 課題番号： 18310096
 研究課題名 (和文) 固有ジョセフソン接合を利用した高温超伝導量子計算機に関する研究
 研究課題名 (英文) High-Tc Superconductor Quantum Computer using Intrinsic Josephson Junctions
 研究代表者
 佐藤 茂雄 (SATO SHIGEO)
 東北大学・電気通信研究所・准教授
 研究者番号： 10282013

研究成果の概要： 高温超伝導体のひとつである Bi-2212 高温超伝導体の結晶中に自然に形成される固有ジョセフソン接合を用いた量子計算機実現に向けて研究を行い、マイクロ波照射による量子状態の共鳴励起に成功し、高温超伝導体量子ビットの有効性を示した。また合わせてデコヒーレンス許容型の量子計算アルゴリズムを提案し、その優位性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2007年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野： 複合新領域

科研費の分科・細目： ナノ・マイクロ科学 ・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード： 量子計算機、高温超伝導体、ジョセフソン接合、断熱的量子計算、Bi-2212、量子ビット

1. 研究開始当初の背景

Si ベース LSI 技術の限界が現実のものとなってきている現在、これに代わる新しい情報処理技術の開発が緊急の研究課題となっている。いわゆるナノテクノロジーの発展を背景として極微細デバイスの作製が容易に行われるようになった今日、そこに発現する量子現象を利用する並列計算、つまり量子計算の有効性が注目を集めている。量子計算アルゴリズムはまだ研究開発の段階であり十分整備されているとは言えないものの、その計算能力は桁外れでありその実用化のインパクトは非常に大きいと考えられる。現在まで各種量子計算機デバイスが提案されているが、超伝導を利用した量

子ビットは現象がマクロスコピックであること、固体デバイスであること、Si-LSI 技術で培われた加工技術が利用できること、量子ビット間の結合を配線によって任意に実現できるなど他の量子ビットと比べて利点が多い。金属系超伝導体を利用した量子ビットは NEC の研究例 [1] を筆頭として最も研究が進んでいる量子ビットのひとつである。その中で本研究で提案する酸化物高温超伝導体では、一般的な超伝導の利点以外に、言うまでもなく相対的に高温動作が可能であること、結晶中に自然に形成される固有ジョセフソン接合を利用するため良質な酸化膜が得られだけでなく均一な超伝導特性を示すなどの

利点を有している。

2. 研究の目的

本研究の目的は Bi-2212 の固有ジョセフソン接合を使った高温超伝導量子計算機を実現することである。Martinis らによって提案されたジョセフソン接合を利用した位相量子ビットを Bi-2212 固有ジョセフソン接合列で構成し、それを用いた量子計算を実現することである。超伝導を利用した量子ビットでは位相量子ビットの他に、磁束量子ビットや電荷量子ビットも提案されているものの、電気的ではなく物理的に単一接合を取り出すことがほとんど不可能である固有ジョセフソン接合では位相量子ビットを実現することが最も適した選択であると考えられる。具体的には、デバイス設計・作製、量子ビット制御・観測、アルゴリズム設計・実行という要素技術の確立を通じて、固有ジョセフソン量子計算機技術の創製を目標とする。また世界で初めての高温超伝導量子ビットの実現を目指す。

3. 研究の方法

Bi2212 固有ジョセフソン接合を用いて、Martinis らによって提案された位相量子ビットを実現する。単一ジョセフソン接合のダイナミクスは RSJ モデルと呼ばれる受動素子モデルで近似できることが知られており、接合を構成する電極間の電子波動関数の位相差を座標変数とし、ジョセフソンエネルギーに相当する 1 次元ポテンシャル中を粒子が運動するという描像が成り立つ。十分低温においてエネルギーは量子化されるため、任意の 2 準位を量子ビットの $|0\rangle$ と $|1\rangle$ に対応させることができ、これを位相量子ビットと呼ぶ。以下に研究内容を 3 つに分けて記載する。

1) 量子ビットデバイス作製

デバイス作製では基本的にはこれまでの手法を踏襲する。必要に応じて改良を図り信頼性のある製作技術を確立する。酸化物高温超伝導体では余剰酸素濃度が物性に大きな影響を与えるため、これを正確に制御し安定に保持することもひとつの課題となる。具体的な製作手順は、両面加工法と FIB によるエッチングを組み合わせて用い、Bi-2212 結晶を S 字型に加工する。こうして結晶 c 軸方向に積層された 20 個程度のジョセフソン接合列を取り出すことができ、これを 1 量子ビットとして利用する。バイアス電流が小さい領域での電気特性は、最も臨界電流が小さい接合のそれと等価である。量子状態の制御には 2 準位間のエネルギーに相当する周波数(接合のプラズマ周波数と呼ぶ)を有する電磁波を利用する。エネルギー差はバイアス電流や外部磁場によって制御可能である。共鳴周波数が大きく

シングルフォトン励起が難しい場合には、マルチフォトン励起を利用する。

2) 理論解析・数値解析

固有ジョセフソン接合とその接合列の物性の詳細については、量子ビット応用という観点から研究の素地がまだ多く残されている。したがって実験によるデータの蓄積と共に理論解析や数値解析を行う協調的な研究遂行が必要不可欠である。MQT の基礎理論となっている Kramers 理論や Caldeira & Leggett 理論を多次元で再適用することが必要と考えられる。さらに、接合同士のカップリングや波動関数位相差の空間分布、スイッチング時(1 接合)の他の接合の動作なども検討課題である。

3) 量子計算アルゴリズム

我々が提案しているニューロ様量子計算アルゴリズムは、適度のデコヒーレンスにより性能が向上するため、実用化に対して有利である。ただしビット相関を使ったハミルトニアンであるため、確率は小さいものの最適解以外の状態も最終状態の中に残ってしまうため、これをどう排除するかが問題となる。このような背景から、まず本アルゴリズムを高温超伝導位相量子ビットへ適用すること、デコヒーレンスによる性能向上を実デバイスのパラメータを使って評価する。

4. 研究成果

1) Bi2212 固有ジョセフソン接合へのマイクロ波照射により、マルチフォトン共鳴による巨視的量子トンネルが強化されること、共鳴周波数とスイッチング電流が単一ジョセフソン接合の理論とほぼ一致することが確認された。

2) ニューロ様量子計算アルゴリズムについて、組み合わせ最適化問題における計算時間と正解率の関係を明らかにした。

3) Bi2212 固有ジョセフソン接合へのマイクロ波照射によりシングルフォトン共鳴による共鳴励起を確認した。

4) Bi2212 固有ジョセフソン接合のスイッチング電流分布に複数のピークが現れること、接合間結合によりスイッチング頻度が増加するなど、単一接合における理論では説明できない現象の観測に成功した。

5) 加工プロセスの違いが、Bi2212 固有ジョセフソン接合の巨視的量子トンネル確率に影響すること、つまりトンネル接合間の結合状態が変化することを実験的に証明した。

6) ニューロ様量子計算アルゴリズムにおいて、デコヒーレンスに比例して計算能力は劣化するものの、他の量子アルゴリズムに比べ劣化が顕著でないことを確認し、本手法の新たな優位性を示した。

7) Bi2212 固有ジョセフソン接合の共鳴特性

から、ラビ振動観測に必要なQ値を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

①佐藤茂雄, 高温超伝導体における巨視的量子トンネリング, 応用物理, 78, 2730, 2009, 査読無(解説記事)

② S. Sato, K. Inomata, M. Kinjo, N. Kitabatake, K. Nakajima, H. B. Wang, T. Hatano, Macroscopic Quantum Tunneling and Resonant Activation of Current Biased Intrinsic Josephson Junctions in Bi-2212, IEICE Trans. Electronics, E90-C, 599-604, 2007, 査読無(招待論文)

③ K. Inomata, S. Sato, M. Kinjo, N. Kitabatake, H. B. Wang, T. Hatano, K. Nakajima, Study of macroscopic quantum tunnelling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions, Superconductor Science and Technology, 20, S105-S109, 2007, 査読有

④ Y. Nakamiya, M. Kinjo, O. Takahashi, S. Sato, K. Nakajima, Quantum Neural Network Composed of Kane's Qubits, Jpn. Journal of Applied Physics, 45, 8030-8034, 2006, 査読有

⑤ H. Li, Hogge Li, Y. Hayakawa, S. Sato, K. Nakajima, Hardware Implementation of an Inverse Function Delayed Neural Network Using Stochastic Logic, IEICE Trans. Inf.&Syst., E89-D, 2572-2578, 2006, 査読有

[学会発表] (計6件)

① A. Ono, S. Sato, M. Kinjo, K. Nakajima, Study on the Performance of Neuromorphic Adiabatic Quantum Computation Algorithms, 2008 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN '08), Hong Kong, 5 June 2008.

② N. Kitabatake, K. Inomata, S. Sato, M. Kinjo, H. Wang, T. Hatano, K. Nakajima, Resonant activation and multi-junction switching characteristics of Bi-2212 intrinsic Josephson junctions, 2008 APS March Meeting, New Orleans, 8 March 2008.

③ N. Kitabatake, K. Inomata, M. Kinjo, S. Sato, K. Nakajima, H. B. Wang, T. Hatano, Resonant Activation and Multiple Switching Characteristics of Bi-2212 Intrinsic Josephson Junctions, Abstracts of 8th European Conference on Applied Superconductivity, Brussels, 18 Sep. 2007.

④ K. Inomata, S. Sato, M. Kinjo, Y. Nakamiya, N. Kitabatake, H. Wang, T. Hatano, K. Nakajima, Study of Macroscopic Quantum Tunneling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junctions, 5th Int. Symp. Intrinsic Josephson Effect in High Tc Superconductors (Plasma 2006), London, 18 July 2006.

⑤ M. Kinjo, S. Sato, K. Nakajima, A Study on Learning with a Quantum Neural Network, 2006 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN '06), Vancouver, 17 July 2006.

⑥ K. Inomata, S. Sato, M. Kinjo, Y. Nakamiya, N. Kitabatake, H. Wang, T. Hatano, K. Nakajima, Observation of Macroscopic Quantum Tunneling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junctions, The 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-HTSC-VIII), Dresden, 13 July 2006.

[図書] (計1件)

① S. Sato, M. Kinjo, Complex-Valued Neural Networks: Utilizing High-Dimensional Parameters, Information Science Reference, 2009.

[その他]

ホームページ等

<http://www.nakajima.riec.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 茂雄 (SATO SHIGEO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号: 10282013

(2) 研究分担者

中島 康治 (NAKAJIMA KOJI)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号: 60125622

早川 吉弘 (HAYAKAWA YOSHIHIRO)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 20250847

小野美 武 (ONOMI TAKESHI)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 70312676

(3) 連携研究者

なし