

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760178

研究課題名（和文） 非接触ナノギア

研究課題名（英文） Untouched Nano-gear

研究代表者

袁 潔（Jie YUAN）

独立行政法人物質・材料研究機構・ナノテクノロジー基盤萌芽ラボ・NIMS ポスドク研究員

研究者番号：70469790

研究成果の概要（和文）：ビスマス系高温超伝導体 Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ 単結晶を用いて、円環形状の外側にギアのように 20 枚の非対称の刃をもつジョセフソン接合（接合列数 30）を試作した。非対称の刃がもたらす効果により、接合を貫く磁束量子の円環面内での回転運動に強い異方性が観測された。磁束量子の高速運動性に起因して、12GHz での整流現象を確認し、高速非接触ギヤとしての基本特性を確認した。この接合のプラズマ周波数が数百 GHz であり、その周波数までの磁束量子の高周波運動が実現していることも同時に明らかにしており、この整流効果が少なくとも数百 GHz まで適用可能であることが期待される。さらに、この現象の普遍性を確認すべく、電子ドープ系高温超伝導体 Pr_{0.9}LaCe_{0.1}CuO₄ (PLCCO) 薄膜を作成して、高速非接触ギヤとしての基本特性を評価した。

研究成果の概要（英文）： We have demonstrated the operation of a deterministic fluxon ratchet in a stack of 30 intrinsic Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ Josephson junctions with the shape of a gear including 20 asymmetric teeth. It produces a pronounced rectified voltage at a 12 GHz drive frequency. As the plasma frequency can be as high as hundreds of GHz, the rectification frequencies as well as the operation frequencies of the superconducting gears can be up to sub-THz regime. Quite recently, we have also successfully fabricated electron-doped superconducting films Pr_{0.9}LaCe_{0.1}CuO₄ (PLCCO) and investigated their transport properties for their applications in untouched gears. All the results suggest that the proposed untouched nano-gear can be realized with unique properties, though more efforts should be taken.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス、ナノギア、ジョセフソン磁束、Qubit

(1) 計算機システム (2) 超伝導材料・素子 (3) マイクロ・ナノデバイス (4) スピンエレクトロニクス (5) 分子モーター

1. 研究開始当初の背景

次世代の情報処理システムの要素デバイスとして、セルオートマトンが挙げられる。セルに求められる要点は、どのように“0”と“1”を作りだし、それらを動作させるかである。既に、量子ドットに2電子の配置により、ロジックが実現している。但し、この素子は極低温でしか動作しない。新動作原理セルを開発して、液体ヘリウム温度以上で動作させることが求められている。

2. 研究の目的

本提案の目的は、新動作原理セルとして、液体ヘリウム温度以上で動作する量子化磁束の配置で“0”と“1”を定義できるナノ超伝導アレイの試作を行うことにある。

3. 研究の方法

ジョセフソン磁束がギアの刃として働くリング形状超伝導接合を用いてセルオートマトン用のセルを試作する。セルとして働く各リングは、磁束間の反発がギアの刃の役割を担い非接触で情報を伝える。このナノサイズリングを「非接触ナノギア」と呼ぶ。非接触ナノギアは、以下の優れた特性が期待できる。

- (1) 超伝導、とくにジョセフソン磁束の特徴である、超高速・超低消費電力動作が期待できる。
- (2) 入出力以外の、各中間リングにバイアスする必要がなく、配線不要のデバイスであるため、高密度化が可能で、設計も容易である。
- (3) 各リングの磁束数を書き換えることにより、プログラムの書き換えも可能である。

4. 研究成果

(1) 我々は電子ドープ $\text{Pr}_{0.9}\text{LaCe}_{0.1}\text{CuO}_4$ (PLCCO) 薄膜の成長に成功し、この薄膜のc軸方向の磁気抵抗とホール効果の測定を行なった。この測定により、磁束格子や単量子磁束の変化に起因する位相変調といったパンケーキ磁束の性質について検討した。固有ジョセフソン接合については、超伝導PLCCO薄膜を用いることによって作製した。この測定ではc軸方向の性質を解明するために、電流-電圧特性を異なる温度、磁場の下で測定し検討を行なった。また、固有ジョセフソン接合中でのPLCCO薄膜のポテンシャルについても検討を行った。

(2) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO) 単結晶の三端子構造を double-side 法により作製した。必要不可欠なトップとボトムとの2つの電極に加え、厚さ 100nm の電極がアレイの中央部に作製されている。この電極は固有ジョセフソン接合の内部に容易に到達し、従来のデバイス物理に関する理解を更に可能とするものである。そして、この三端子構造をもつ BSCCO のホール抵抗の温度依存性と磁場依存性について慎重に測定を行なった。その結果、BSCCO におけるジョセフソン磁束の動きの規則性は、c軸以外のホール効果によるものであると結論付けられた。これが、ジョセフソン磁束の制御と非接触ナノギア実現化に関する見解の基礎である。

(3) ビスマス系高温超伝導体を用いた固有ジョセフソン接合 (接合数 30) により磁束量子へのラチェット効果を実証した。ラチェットはリング状の接合に 20 個の非対称の歯車状の歯をつけたものである。整流効果は、12 GHz 交流電流入力に大だし、100 μV に達した。接合間の結合効果を理解するために、2次元結合サイン・ゴードン方程式によるシミュレーションを実施した。さらに、低温レーザー顕微鏡により、実際に整流効果が磁束の運動状態と一致していることを証明した。

(4) 一方、我々の発見した、固有ジョセフソン接合巨大スタックからのテラヘルツ放射新条件において、結晶内での電磁波励起パターンを低温レーザー顕微鏡で観測することに成功し、PRL 誌に発表した。(固有ジョセフソン接合巨大スタック結晶中心付近に現れる“HOT-SPOT”、即ち超伝導遷移温度以上に発熱している部分がバイアス電流に依存して大きさを変え、それに伴い定在波パターンの形が変わることで発振周波数が変化することが見いだされた。) 今年度は、この新条件において、励起電磁波パターンと放射されるテラヘルツ波の強度・スペクトラムを同一の結晶において観測することに成功し、目下、第2報としてPRL誌に投稿中である。実験結果から計算された位相速度が、電磁波の媒質中速度に到達したことを示唆している。本研究課題提案「非接触ギヤ」は有望な研究テーマであるので、今後も引き続き展開していきたい。

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 9 件)

- ① H. B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, and R. Kleiner, "Hot spots and waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks - a study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 102, 017006 (2009). 査読有
- ② J. Yuan, H. B. Wang, I. Iguchi, Y.Y. Hsu, S. Arisawa, A. Ishii, T. Hatano, "Growth of electron-doped superconductor $\text{Pr}_{0.9}\text{LaCe}_{0.1}\text{CuO}_4$ films and their applications to intrinsic Josephson junctions", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19, 3443-3446 (2009). 査読有
- ③ J. Yuan, H. B. Wang, I. Iguchi, S. Arisawa, A. Ishii, T. Hatano, "In-plane magnetoresistance of electron-doped superconducting thin films $\text{Pr}_{0.9}\text{LaCe}_{0.1}\text{CuO}_4$ ", *Physica C* 469 1140-1142 (2009). 査読有
- ④ H. Wu, J. Yuan, T. Peng, Y. Pan, T. Han, and C. Liu, "Temperature- and field-dependent leakage current of epitaxial YMnO_3/GaN heterostructure", *Appl. Phys. Lett.* 94, 122904 (2009). 査読有
- ⑤ H. Wu, J. Yuan, T. Peng, Y. Pan, T. Han, K. Shen, B. R. Zhao and C. Liu, "Control of the epitaxial orientation and reduction of the interface leakage current in YMnO_3/GaN heterostructures", *Journal of Physics D: Applied Physics* 42 185302 (2009). 査読有
- ⑥ B.X. Wu, K. Jin, J. Yuan, H. B. Wang, T. Hatano, B.R. Zhao, B.Y. Zhu, "Preparation of electron-doped $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4\pm\delta}$ thin films with various Ce doping by dc magnetron sputtering", *Physica C* 469 1945-1949 (2009) 査読有
- ⑦ B. X. Wu, K. Jin, J. Yuan, H. B. Wang, T. Hatano, B. R. Zhao and B. Y. Zhu, "Thickness-induced insufficient oxygen reduction in $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4\pm\delta}$ thin films", *Supercond. Sci. Technol.* 22, 085004 (2009). 査読有
- ⑧ J. Yuan, S. J. Zhu, K. Jin, H. Wu, B. Xu, X.G. Qiu, B. R. Zhao, "In-plane stress effect on the electron-doped superconductor $\text{La}_{1.89}\text{Ce}_{0.11}\text{CuO}_4$ thin films", *Physica C* 468 (15-20), 1876-1878 (2008). 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ① H. B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, Z.G. Jiang, Y.Y. Zhong, P. H. Wu, A. Iishi, T. Hatano, G. Boris, M. Gruenzweig, D. Koelle, and R. Kleiner, "Observation of THz oscillations in stacked Josephson junctions with low temperature scanning laser microscope", 研究討論会「テラヘルツ電子デバイスの新展開」, 仙台, Feb.25-26, 2010.
- ② H. B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, Z.G. Jiang, Y.Y. Zhong, P. H. Wu, A. Iishi, T. Hatano, G. Boris, M. Gruenzweig, D. Koelle, and R. Kleiner, "Terahertz Emission from a Slice of Cuprate Superconductor-Excitation, Synchronization, Detection, and Future Application", The First JST-DFG Workshop on Terahertz Superconductor Electronics, Tsukuba, Japan, February 21-24, 2010.
- ③ H.B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, Boris Gross, Z.G. Jiang, M.Gruenzweig, Y. Y. Zhong, A. Iishia, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, and R. Kleiner, "Terahertz electronics on the atomic scale using intrinsic Josephson junctions in cuprate superconductors", DFG-JST Workshop on Nanoelectronics, 17-19.1., 2010, Bad Honnef
- ④ H. B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, Z.G. Jiang, Y.Y. Zhong, P. H. Wu, A. Iishi, T. Hatano, G. Boris, M. Gruenzweig, D. Koelle, and R. Kleiner, "Tunable THz sources with large Josephson junctions", The International Workshop on Terahertz Radiation and Metamaterials, Benasque, Spain, December 15-22, 2009.
- ⑤ H. B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, Z.G. Jiang, Y.Y. Zhong, P. H. Wu, A. Iishi, T. Hatano, G. Boris, M. Gruenzweig, D. Koelle, and R. Kleiner, "Tunable THz Josephson oscillators", 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究研究会「環境負荷低減に資する超伝導計算機技術に関する研究」, 仙台, Nov.26, 2009.
- ⑥ H. B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, Z.G. Jiang, Y.Y. Zhong, P. H. Wu, A. Iishi, T. Hatano, G. Boris, M. Gruenzweig, D. Koelle, and R. Kleiner, "Observation of THz oscillations in stacked Josephson junctions with low temperature scanning laser microscope", Eastern Asia Symposium on Superconductor Electronics, Nanjing, China, Oct.11-15, 2009.
- ⑦ H.B. Wang, S. Guenon, J. Yuan, G. Matthias,

A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, R. Kleiner, "Terahertz Generation in Large Bi2Sr2CaCu2O8 Intrinsic Josephson Junction Stacks", 12th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2009), June 16-19, 2009, Fukuoka, JAPAN

- ⑧ S. Guénon, M. Grünzweig, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, "Intrinsic Josephson junctions in high temperature superconductors as generators for THz radiation", "SEFIRA 09" (Superconducting electronics front end infrastructure), Fréjus, 26.-28.5.2009
- ⑨ S. Guénon, M. Grünzweig, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, "Inside the Terahertz gap - intrinsic Josephson junctions in high temperature superconductors", (Colloquium, University of Graz, 28.4.2009).
- ⑩ S. Guénon, M. Grünzweig, D. Koelle, R. Kleiner, H. B. Wang, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, "Intrinsic Josephson junctions in high temperature superconductors as generators for THz radiation", WE-Heraeus Seminar on Microwaves for Condensed Matter Physics, Bad Honnef, 5.-8. 4. 2009
- ⑪ 袁潔, 王華兵, 有沢俊一, 石井明, 羽多野毅, "BSCCO 単結晶にc軸以外の方向から磁場を印加した時のホール効果", 2009 応用物理学春季講演会, April 2, 2009, 筑波大学.
- ⑫ S. Guénon, M. Gruenzweig, H. B. Wang, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, R. Kleiner, "Laser imaging of hot spots and waves in Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson junctions", DPG Spring Meeting, 22.-27.3., 2009, TU Dresden, Dresden, Germany.
- ⑬ M. Gruenzweig (Tuebingen University), S. Guénon, H. B. Wang, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, R. Kleiner, "Investigation of self-heating in BiSrCaCu2O8 single crystals via Low Temperature Scanning Laser Microscopy", DPG Spring Meeting 22.-27.3., 2009, TU Dresden, Dresden, Germany.
- ⑭ J. Yuan, H. B. Wang, I. Iguchi, S. Arisawa, A. Ishii, T. Hatano, "In-plane magnetoresistance of electron-doped superconducting thin films Pr_{0.9}LaCe_{0.1}CuO₄", 21st international symposium on superconductivity, Oct. 28, 2008, Tsukuba, Japan.
- ⑮ J. Yuan, H. B. Wang, I. Iguchi, Y. Y. Hsu, S. Arisawa, A. Ishii and T. Hatano, "Growth of

electron-doped superconductor Pr_{0.9}LaCe_{0.1}CuO₄ films and their applications to intrinsic Josephson junctions", Applied Superconductivity Conference 2008, 2008.8.20, Chicago, U.S.A.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

袁 潔 (Jie YUAN)

独立行政法人物質・材料研究機構・ナノテクノロジー基盤萌芽ラボ・NIMS ポスドク 研究員

研究者番号 : 70469790

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし