

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560309
 研究課題名(和文) 超伝導超格子のテラヘルツ波—磁束量子—電子対相互作用制御とデバイス化への基礎研究
 研究課題名(英文) Basic Studies on Control of the Terahertz Waves-Magnetic Flux Quanta-Electron Pairs Interactions in Superconducting Superlattices and for Applications of them to Devices
 研究代表者
 大矢 銀一郎 (OYA GIN-ICHIRO)
 宇都宮大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00006280

研究成果の概要(和文)：標記の課題研究に向け、鉛無添加および添加 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 高温超伝導体の固有ジョセフソン接合で構成される微小単結晶素子を作製した。その基本的特性を磁界ならびにマイクロ波印加の下で実験的に、そして計算機シミュレーションによっても研究した。その結果に基づき、固有ジョセフソン接合により構成される1組の発振素子と検出素子を同一基板上に作製し、ジョセフソンボルテックスフローの利用により 0.7 THz 電磁波の発振・検出の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：The miniaturized single-crystal devices composed of intrinsic Josephson junctions of lead-free and -substituted $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ high- T_c superconductors were fabricated for the above mentioned studies. The basic properties of them under magnetic field and microwave irradiation were studied experimentally and also by computer simulations. On the basis of the results, a couple of oscillator and detector composed of intrinsic Josephson junctions were constructed on a substrate, and the oscillation and detection of 0.7 THz electromagnetic waves were successfully done by them using the Josephson vortex flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	0	0	0
2011年度	0	0	0
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：(A) 電気・電子材料(半導体, 誘電体, 磁性体, 超誘電体, 有機物, 絶縁体, 超伝導体など), (B) 薄膜・量子構造, (D) 作成・評価技術

1. 研究開始当初の背景
 電波の物質透過性と光波の直進性の両性質

を併せ持つテラヘルツ電磁波(以下, テラヘルツ波)は, 次世代の超高速光通信はもちろ

んのこと、医学、分子分光、生体工学などの幅広い分野での工学的応用が期待できる新たな周波数資源として注目されている。

しかし、小型で簡便なテラヘルツ波発生源、特に固体素子の開発が遅れたため、テラヘルツ技術の実用化はあまり進んでいない。

現在、(1)可変周波数、(2)連続波、(3)高出力、(4)低消費電力等の条件に対応できる取り扱いが簡単なテラヘルツ光源の開発が求められている。

このような中、高温超伝導体固有ジョセフソン超格子のテラヘルツ光源としての研究は、立木らが同超格子に磁場を印加したときジョセフソン・プラズマ共鳴によりテラヘルツ波が発生しうるとを理論的に示したことに端を発するが、実験的には未だ十分な検証がなされておらず、実験研究の展開に大きな期待が寄せられている。

2. 研究の目的

現代の高度情報化社会は半導体デバイスの高性能化により支えられている。しかし、従来の半導体デバイス技術の延長ではその性能向上が限界に近づきつつあるため、異なる視点からのデバイス開発が必要不可欠である。本研究は、このような観点から、新しい原理に基づく高性能なデバイスとしてテラヘルツ・デバイスの創出を目指し、高温超伝導体単結晶に内在する固有ジョセフソン・トンネル接合超格子に発現する新物性・物理を電磁波物性の点から探求し、新しいテラヘルツ・エレクトロニクスの展開に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、鉛無添加および添加 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 高温超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合超格子に発現する量子効果を基盤としたテラヘルツ・デバイス創出を目指す基礎研究であり、以下のように進める。

(1) 磁界印加時に固有ジョセフソン接合超格子に生ずるボルテックス(磁束量子)運動と、それによるテラヘルツ波励起のための最適条件を研究する。

(2) 固有ジョセフソン接合超格子におけるテラヘルツ波応答特性を解明する。

(3) 固有ジョセフソン接合超格子における光学フォノン・交流ジョセフソン電流・テラヘルツ波の相互作用を究明する。

(4) 固有ジョセフソン接合超格子を用いたテラヘルツ波発生・検出ハイブリッド構造(素子)を作製し、その特性を検証して、同構造の応用への道を拓く。

4. 研究成果

(1) 鉛無添加および添加 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 高温超伝導体の固有ジョセフソン接合で構成される微小単結晶素子 ($(5-7) \times (5-50) \mu\text{m}^2$) を微細加工技術により作製した。

(2) 作製したデバイスにおいて、超格子に斜め方向から磁界を印加した場合、平行磁界成分による接合内のジョセフソン・ボルテックス(磁束量子)と、垂直磁界成分による超伝導層内のアプリコソフ・ボルテックスが強く相互作用して、前者のフロー運動が抑制、さらに抑止されることを観測した。このことより、固有ジョセフソン接合超格子によるジョセフソンボルテックス(磁束量子)フロー発振を実現するには、磁界を接合面に正確に平行に印加して磁束量子フロー動作を行うことが重要であることを明らかにした。

(3) 高臨界電流固有ジョセフソン接合超格子において、高バイアス電流を制御することにより、この電流磁界に起因するジョセフソンボルテックスが侵入・フローし、そのフロー抵抗が制御可能となるため、マイクロ波をこの超格子に印加した場合、シャピロステップ応答条件が満足され、シャピロステップの観測が可能となることを見出した。

(4) 同超格子において、ジョセフソンボルテックスフローがジョセフソン接合間で相互作用する場合には、シャピロステップ応答も接合間で同期して生ずることを観測した。同現象は、*d*波超伝導性をとり入れたジョセフソン接合超格子モデルに基づくコンピュータ・シミュレーションによっても確認した。

(5) 固有ジョセフソン接合のテラヘルツ領域における交流ジョセフソン電流とラマン活性光学フォノンとの干渉により、電流-電圧特性上にサブギャップ構造が出現することを明確にした。

(6) 上記の結果を踏まえ、固有ジョセフソン接合超格子のジョセフソンボルテックス(磁束量子)フローを利用する方式の電磁波発振素子およびシャピロステップ応答を利用する方式の電磁波検出素子による複合素子を作製し、その機能確認実験を行った。その結果、本方式で初めて、0.7 THz の電磁波の発振および検出を確認することに成功した。

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 12 件)

- ① Michihide Kitamura, Akinobu Irie, and Gin-ichiro Oya, Condition for observing Shapiro steps in a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ high- T_c superconductor intrinsic Josephson junction: Numerical calculations, Physical

- Review B, 査読有, Vol. 76, 2007, pp. 064518-1—5.
- ② Akinobu Irie and Gin-ichiro Oya, Effect of thermal fluctuations on Josephson vortex dynamics in intrinsic Josephson junctions, *Superconductor Science and Technology*, 査読有, Vol. 20, 2007, pp. S18—S22.
 - ③ Akinobu Irie, Shingo Okano, and Gin-ichiro Oya, Multijunction SQUID based on intrinsic Josephson junctions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 17, No. 2, 2007, pp. 687—690.
 - ④ Akinobu Irie and Gin-ichiro Oya, Thermally assisted vortex motion in intrinsic Josephson junctions, *Journal Physics: Conference Series*, 査読有, Vol. 97, 2008, pp. 012244 1—6.
 - ⑤ Michihide Kitamura, Akinobu Irie, and Gin-ichiro Oya, Shapiro steps in $\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson Junctions in magnetic field, 査読有, Vol. 104, No. 6, 2008, pp. 063905 1—13.
 - ⑥ Akinobu Irie, Yu. M. Shukrinov, and Gin-ichiro Oya, Experimental manifestation of the breakpoint region in the current-voltage characteristics of intrinsic Josephson junctions, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 93, 2008, pp. 152510-1—3.
 - ⑦ Akinobu Irie and Gin-ichiro Oya, Numerical simulations of Fiske steps in intrinsic Josephson junctions, *Physica C*, 査読有, Vol. 468, 2008, pp. 679—683.
 - ⑧ Akinobu Irie, Yu. M. Shukrinov, and Gin-ichiro Oya, Experimental observation of the longitudinal plasma excitation in intrinsic Josephson junctions, *Journal Physics: Conference Series*, 査読有, Vol. 129, 2008, pp. 012029 1—7.
 - ⑨ Hirokazu Kaneoya, Akinobu Irie and Gin-ichiro Oya, The behavior of subgap structures of intrinsic Josephson junctions in $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ under magnetic field and microwave irradiation, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 19, No. 3, 2009, pp. 195—198.
 - ⑩ Akinobu Irie and Gin-ichiro Oya, Simulation of the effect of temperature on flux-flow behavior in Stacked intrinsic Josephson junctions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, Vol. 19, No. 3, 2009, pp. 730—733.
 - ⑪ Gin-ichiro Oya, Yuji Matsumoto, Ryusuke Hironaga, and Akinobu Irie, The influence of inclination of magnetic field on Josephson-vortex flow in intrinsic Josephson junctions in $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ single-crystal mesas, *Physica C: Superconductivity*, 査読有, 印刷中.
 - ⑫ Michihide Kitamura, Akinobu Irie, and Gin-ichiro Oya, Numerical study of multi-hole SQUIDs using $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions, *Physica C: Superconductivity*, 査読有, 印刷中.
- [学会発表] (計 21 件)
- ① Nurmiza Othman, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合におけるマイクロ波誘起ステップ, 応用物理学会, 2007 年 9 月 4 日, 北海道工業大学.
 - ② 松本祐二, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ($x=0.15$) 固有ジョセフソン接合におけるサブブランチ構造, 応用物理学会, 2007 年 9 月 4 日, 北海道工業大学.
 - ③ 小西将大, 固有ジョセフソン接合へのスピン注入, 応用物理学会, 2007 年 9 月 4 日, 北海道工業大学.
 - ④ Nurmiza Othman, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合におけるマイクロ波照射効果, 応用物理学会, 2008 年 3 月 27 日, 日本大学.
 - ⑤ 入江晃亘, 固有ジョセフソン接合における自己共振モードの数値解析, 応用物理学会, 2008 年 3 月 27 日, 日本大学.
 - ⑥ 松本祐二, 固有ジョセフソン接合におけるサブブランチ構造の磁場依存性, 応用物理学会, 2008 年 3 月 27 日, 日本大学.
 - ⑦ Gin-ichiro Oya, Resonant states in vortex flow in stacked intrinsic Josephson junctions of $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$, The 6th International Symposium on Intrinsic Josephson Effect and Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors, 2008 年 7 月 18 日, POSCO International Center, Pohang, Korea.
 - ⑧ 松本祐二, 固有ジョセフソン接合におけるサブブランチ構造, 応用物理学会, 2008 年 9 月 5 日, 中部大学.
 - ⑨ Nurmiza Othman, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合におけるマイクロ波応答, 応用物理学会, 2008 年 9 月 5 日, 中部大学.
 - ⑩ 小西将大, $\text{Co}/\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y/\text{Au}/\text{Co}$ 接合の臨界電流の磁場依存性, 応用物理学会, 2008 年 9 月 5 日, 中部大学.
 - ⑪ 広長隆介, 固有ジョセフソン接合への印加磁場傾斜効果, 応用物理学会, 2009 年 4 月 2 日, 筑波大学.
 - ⑫ 小西将大, 固有ジョセフソン接合へのスピン注入(II), 応用物理学会, 2009 年 4 月 2 日, 筑波大学.
 - ⑬ Nurmiza Othman, Microwave response of

intrinsic Josephson junctions in $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ with high critical currents, 12th International Superconductive Electronics Conference, 2009年6月18日, 九州大学.

- ⑭ 広長隆介, 固有ジョセフソン接合への印加磁場傾斜効果(II), 応用物理学会, 2009年9月9日, 富山大学.
- ⑮ 藤野雅俊, 固有ジョセフソン接合におけるヒステリシスの抑圧, 応用物理学会, 2009年9月9日, 富山大学.
- ⑯ 斉藤優, 固有ジョセフソン接合を用いた電磁波の発生と検出, 応用物理学会, 2009年9月9日, 富山大学.
- ⑰ 宮坂貴広, 高臨界電流 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合のマイクロ波応答特性, 応用物理学会, 2010年3月18日, 東海大学.
- ⑱ 広長隆介, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 単結晶ジョセフソンボルテックスフロー素子の開発, 応用物理学会, 2010年3月18日, 東海大学.
- ⑲ 斉藤優, 固有ジョセフソン接合を用いた電磁波の発生と検出(II), 応用物理学会, 2010年3月18日, 東海大学.
- ⑳ 山田清孝, 固有ジョセフソン接合のヒステリシスの磁場依存性, 応用物理学会, 2010年3月18日, 東海大学.
- ㉑ 荒川直大, 固有ジョセフソン接合へのスピニ注入(III), 応用物理学会, 2010年3月18日, 東海大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大矢 銀一郎 (OYA GIN-ICHIRO)
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00006280

(2) 研究分担者

入江 晃亘 (IRIE AKINOBU)
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90241843
北村 通英 (KITAMURA MICHIHIDE)
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90161497