

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04818

研究課題名（和文）超伝導スピバルブ・ジョセフソン接合の創成

研究課題名（英文）Development of superconducting spin valve josephson junctions

研究代表者

高村 陽太（Takamura, Yota）

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：20708482

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超伝導スピバルブ・ジョセフソン接合の材料系としてCoFe204/NbやCo2FeAlSi/Nbのヘテロ接合を評価し、デバイス作製と改良を行いました。強磁性絶縁体とNbの接合界面評価により、CoFe204/Nbが磁気伝導効果を示すことを確認し、ナノコンタクト接合の最適化を進めました。最終年度には、低ノイズ高感度な測定系を導入し、スピン信号の検出に成功。これにより次世代超伝導スピントロニクスデバイスの開発に重要な知見を得ました。また、MITとの国際共同研究で論文発表も実施しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超伝導スピントロニクスデバイスの材料系としてCoFe204/NbとCo2FeAlSi/Nbヘテロ接合の有効性を示し、超伝導スピバルブ効果を実証しました。これにより、超高感度で低エネルギー消費のスピントロニクスデバイスの開発に寄与し、次世代の情報処理技術の進展を促進します。さらに、MITとの国際共同研究を通じて、グローバルな学術交流を推進し、研究の信頼性と影響力を高めました。

研究成果の概要（英文）：In this study, we evaluated CoFe204/Nb and Co2FeAlSi/Nb heterojunctions as material systems for superconducting spin Josephson junctions and conducted device fabrication and improvement. The interface evaluation between the ferromagnetic insulator and Nb confirmed that CoFe204/Nb exhibits a spin-related magnetoresistance effect. Optimization of nano-contact junctions was advanced. In the final year, a low-noise, high-sensitivity measurement system was introduced, successfully detecting spin signals. This provided crucial insights for the development of next-generation superconducting spintronics devices. Additionally, an international collaborative paper with MIT was published.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 超伝導体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータの実現には、量子ビットと古典的演算デバイスのハイブリッドシステムが重要視されています。量子ビットは量子アルゴリズムの実行に必要な部分を担い、その他の情報処理や信号処理は従来の古典的な演算システムに任せるといった方式です。この古典的な演算システムは、量子ビットと物理的に接続されるため、冷却される必要があります。したがって、古典的デバイスも 4.2 K の極低温で動作させる必要があります。しかし、この温度で高性能を示す決定的なメモリは存在しません。

この問題を解決するために、本研究では待機時に発熱しない不揮発性を持つスピン(磁化)と超低損失な超伝導の相互作用、すなわち「超伝導スピバルブ効果」に注目しました。これをメモリ素子として応用することで、量子コンピュータシステムの超低温動作に整合するメモリを実現しようとしてきました。具体的には、強磁性絶縁体と超伝導体の接合界面を評価し、スピバルブ効果を検証し、ジョセフソン接合デバイスの動作実証を目指しました。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導スピバルブ効果を利用して、量子コンピュータの超低温動作に適合する超低発熱な不揮発性メモリ素子を開発することです。具体的には、以下のような目標を掲げました：

1. 強磁性絶縁体と超伝導体の接合界面の評価と高品質な接合の実現。
2. 超伝導スピバルブ効果の定量的評価とその強度の最大化。
3. ジョセフソン接合デバイスの試作とその動作実証。
4. 超伝導スピバルブの逆効果を利用した新しい磁化反転方式の検討。

### 3. 研究の方法

本研究は、以下のような方法で進めました。

#### 3-1) 材料の作製と接合界面の評価：

強磁性絶縁体として  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  を使用し、これをラジカル酸化法で作製しました。超伝導体としては、Nb をスパッタリング法で成膜しました。これにより、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  と Nb の高品質な接合を実現しました。接合界面の評価には、磁化特性の測定やラマン分光法を用いて、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  がバルクに近い磁化特性を持ち、結晶化していることを確認しました。また、Nb 薄膜が高い転移温度を示すことから、超伝導体としての高品質を確認しました。

#### 3-2) 超伝導スピバルブ効果の評価：

$\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Nb}$  二層構造において、超伝導スピバルブ効果の強さを特徴づける交換磁場を転移温度を評価しました。具体的には、Nb を薄層化した際の転移温度の低下具合を測定し、交換磁場を定量的に見積もりました。

#### 3-3) ナノコンタクト接合の作製と評価：

次に、超伝導体 Nb とハーフメタル強磁性体  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.3}\text{Si}_{0.67}$  のヘテロ接合を作製しました。これには、電子ビーム露光技術を用いて直径 100nm 程度の円柱を作製し、ナノコンタクト接合を実現しました。ホイスラー合金の結晶構造および規則度の定量評価には、X 線回折法を用いました。また、寄生抵抗を極力減らすために、BCB の頭出しプロセスを採用し、デバイスの試作を行いました。

最終年度には、デバイスの改良を進め、低ノイズで高感度な測定が可能なロックインアンプを導入しました。また、デバイスの平面構造を見直し、擬似的な 4 端子法を適用できるようにしました。さらに、ディッピング法で多数のデバイスを測定しました。

### 4. 研究成果

#### 4-1) 強磁性絶縁体と超伝導体の接合界面の評価：

$\text{CoFe}_2\text{O}_4$  と Nb の高品質な接合を実現し、磁化特性やラマン分光法を用いて、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  がバルクに近い磁化特性を持ち、結晶化していることを確認しました。また、Nb 薄膜が高い転移温度を示すことから、超伝導体としての高品質を確認しました。

#### 4-2) 超伝導スピバルブ効果の評価：

CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Nb 二層構造において、交換磁場を見積り、既存の材料系である EuS/Nb に比べて 6 倍大きな交換磁場が得られることが明らかになりました。この結果は、CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Nb 系が超伝導スピントロニクス接合の材料として高いポテンシャルを持つことを示しています。また、三層構造においても 2 K 以下での超伝導転移を確認し、新たな磁気抵抗変化を観測しました。

#### 4-3) ナノコンタクト接合の作製と評価：

超伝導体 Nb と高スピン分極率材料である Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.33</sub>Si<sub>0.67</sub> のヘテロ接合を作製しました (図 1)。部分的に規則化した B2 構造を有することを確認しました。また、規則度はほぼ 100%でした。試行錯誤の後、ナノコンタクト接合の作製に成功し、最終的にはスピン信号の検出に成功しました。寄生抵抗を差し引いた後の信号ではあるものの、スピン分極率は約 60%でした(図 2)。この成果により、超伝導体/強磁性体界面の特性を評価することができ、次世代の超伝導スピントロニクスデバイスの開発に貢献する基盤を築くことができました。この成果は、2024 年 9 月の応用物理学学会で発表する予定である。

また、本研究の成果は、国際共同研究や論文発表を通じて、超伝導スピントロニクス分野の発展に寄与するものであり、次世代の量子コンピュータシステムの実現に向けた重要な一歩となりました。

本研究(の一部)は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業の支援を受けて実施されました。

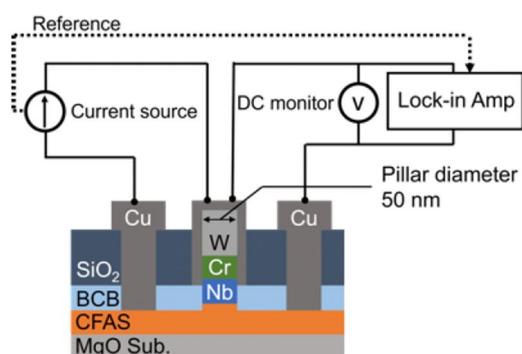


図 1 ナノコンタクト

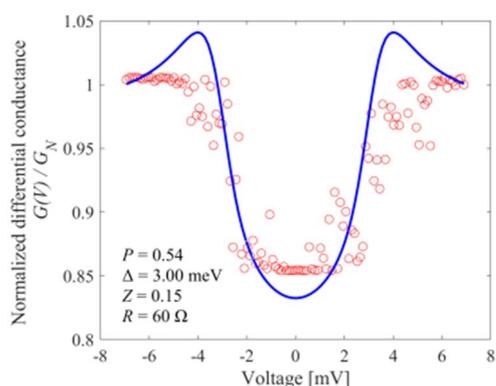


図 2 得られたスピン信号

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsushita Eisuke, Takamura Yota, Nakagawa Shigeki	4. 巻 562
2. 論文標題 Investigation of perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co <sub>2</sub> FeSi/MgO structures with evaluations of magnetic property, crystal structure, and elemental mapping	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 169796 ~ 169796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2022.169796	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Vilela G. L. S., Stephen G. M., Gratens X., Galgano G. D., Hou Yasen, Takamura Y., Heiman D., Henriques A. B., Berera G., Moodera J. S.	4. 巻 109
2. 論文標題 Spin splitting tunable optical band gap in polycrystalline GdN thin films for spin filtering	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L060401/1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.109.L060401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Y. Sasaki, T. Shirokura, K. Masuda, Y. Takamura, S. Nakagawa.
2. 発表標題 Detection of spin-orbit torque on magnetostrictive SmFe <sub>2</sub> thin films with perpendicular magnetic anisotropy for piezoelectronic magnetic tunnel junctions,
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Masuda, Y. Sasaki, Y. Takamura, S. Nakagawa.
2. 発表標題 Crystallographic analysis of SmFe <sub>2</sub> /CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kameoka, T. Miyake, J. Ow, Y. Takamura, and S. Nakagawa
2. 発表標題 Characterization of spin polarization in ordered Co-based full Heusler Co <sub>2</sub> FeAl <sub>0.33</sub> Si <sub>0.67</sub> alloy thin films using nano-contact Andreev reflection technique
3. 学会等名 第85回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中川 茂樹 (Nakagawa Shigeki)	(12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------