

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18145

研究課題名（和文）超伝導ダイオード効果の機構解明と不揮発性超伝導ダイオード素子の創出

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanism of the superconducting diode effect and creation of non-volatile superconducting diode devices

研究代表者

小野 輝男（Ono, Teruo）

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：90296749

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者らが見出した「超伝導ダイオード効果（Nature 584, 373 (2020)）」の機構を解明し、不揮発性超伝導ダイオード素子を創出することに成功した。研究代表者らが見出した超伝導ダイオード効果は、時間反転対称性を破るために外部磁場が必要であったが、超伝導人工格子に磁性体を導入し、磁性体の磁化によって時間反転対称性を破ることで、無磁場下での超伝導ダイオード効果を実現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者らが見出した超伝導ダイオード効果は、時間反転対称性を破るための外部磁場を必要であったが、超伝導人工格子に磁性体を導入し、磁性体の磁化によって時間反転対称性を破ることで、無磁場下での超伝導ダイオード効果を実現することに成功した。これにより、無磁場下で超伝導ダイオード効果を利用できるばかりでなく、磁性体の磁化の向きによる超伝導ダイオードの極性制御が可能となった。磁性体の磁化の向きによる超伝導ダイオードの極性制御が可能ということは、磁性体の磁化を利用した不揮発メモリ機能を超伝導ダイオードに付加できることを意味し、不揮発性超伝導論理回路が可能となる。

研究成果の概要（英文）：The mechanism of the “superconducting diode effect” (Nature 584, 373 (2020)), which was discovered by the Principal Investigators, has been elucidated, and a nonvolatile superconducting diode device has been successfully created. The superconducting diode effect discovered by the Principal Investigators required an external magnetic field to break the time-reversal symmetry. However, by introducing a magnetic layer into the superconducting artificial lattice and breaking the time-reversal symmetry by magnetization, we succeeded in realizing the superconducting diode effect under no magnetic field.

研究分野：磁性物理

キーワード：超伝導 磁性 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、ニオブ (Nb) 層、バナジウム (V) 層、タンタル (Ta) 層から構成される非対称構造を有した人工格子において (図 1(a))、測定電流と垂直に外部磁場を印加すると (図 1(b))、超伝導の臨界電流の大きさが電流方向に依存することを見出した (図 1(c))。図 1(c)の結果は、順方向の臨界電流と逆方向の臨界電流の間の電流値では、順方向では超伝導状態でゼロ抵抗であるが、逆方向では常伝導状態で抵抗が有限となることを示し、超伝導ダイオード効果と呼ぶべき現象が観測されたことを意味する (Nature 584, 373 (2020))。さらに、この超伝導ダイオード効果は、極性が外部磁場で切り替え可能であるという、従来のダイオードにはない特徴を持つ。

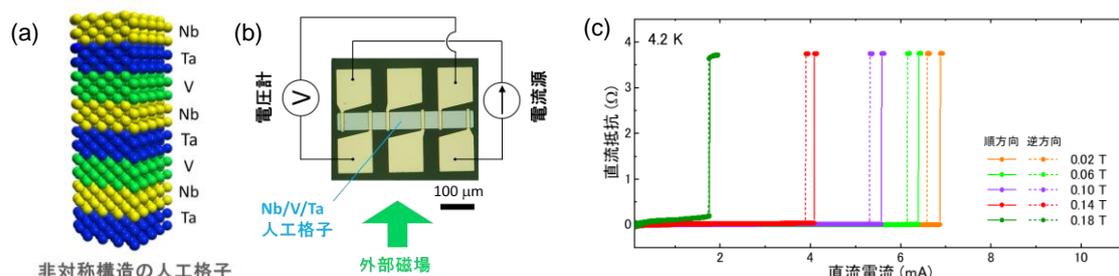


図 1 (a) 非対称構造 Nb/V/Ta 人工格子の概念図 (b) 試料の光学顕微鏡図と 4 端子電気抵抗測定の実験配置 (c) 磁場中での抵抗の測定電流方向依存性 (順方向 (実線)、逆方向 (点線))

2. 研究の目的

本研究では、超伝導ダイオード効果の物理的機構を解明し、外部磁場なしで動作する不揮発性超伝導ダイオード素子を創出することを目的とした。

3. 研究の方法

1. 超伝導ダイオード効果の機構解明

超伝導ダイオード効果に関する理論は皆無であるため、複数の理論的手法を用いて多方面からこの問題にアプローチする。まず、ギンツブルグ・ランダウ理論を用いて、転移温度近傍の臨界領域で超伝導ダイオード効果が従うスケーリング則を導出する。次に、ラシュバ型スピン軌道相互作用を含むミクロなモデルを BCS 理論により解析し、超伝導ダイオード効果の微視的機構を明らかにする。さらに、超伝導準古典理論を用いて超伝導ボルテックスの影響を調べる。これらの理論を相補的に用いて、以下の研究項目の実験結果の解析を行い、超伝導ダイオード効果の機構を解明する。

- 1-1. 外部磁場角度依存性
- 1-2. 臨界磁場ダイオード効果
- 1-3. 電流誘起有効磁場の見積もり
- 1-4. Ta/V/Nb 人工格子
- 1-5. 表面・界面効果・歪効果による超伝導ダイオード効果探索
- 1-6. 超伝導ダイオード効果と非相反電気抵抗の相関

2. 無磁場での超伝導ダイオード効果

- 2-1. 無磁場での超伝導ダイオード効果と不揮発性超伝導ダイオード素子への展開

図 1 に示された超伝導ダイオード効果は、時間反転対称性を破るための外部磁場を必要とする。図 2 のように磁性体 (Fe や Co など) を導入することで、超伝導体のクーパーペアに磁性体からの交換相互作用を働かせ時間反転対称性を破ることを試みる。この試みが成功すれば、外部磁場なしでの超伝導ダイオード効果の発現が可能となり、超伝導ダイオードの極性を磁性体の磁化方向で制御できるようになる。磁性体の不揮発性を利用した書き換え可能な超伝導ダイオード論理回路の実現へとつながる。

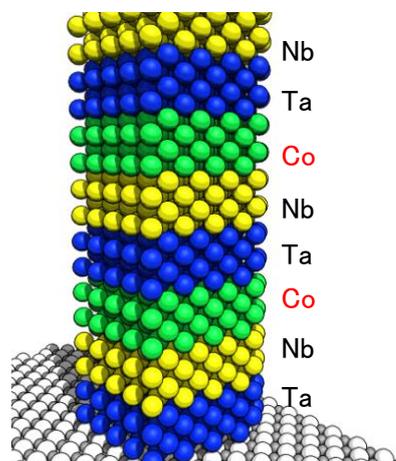


図 2 磁性体を利用した不揮発性超伝導ダイオード素子の提案図

4. 研究成果

研究代表者らの想定する超伝導ダイオード効果のシナリオが正しければ、超伝導が破壊される臨界磁場の大きさも電流方向に依存する超伝導臨界磁場の非相反効果が存在するはずである。今年度はこの超伝導臨界磁場の非相反効果を実証し論文報告をおこなった (Appl. Phys. Express 14, 073003)。さらに、超伝導臨界電流の非相反性が外部磁場の大きさに対して振動するという現象を実験的に見出し、この現象を定性的に説明する理論を構築した。研究代表者らの見出した超伝導ダイオード効果は、時間反転対称性を破るための外部磁場を必要とするが、今回、超伝導人工格子に磁性体を導入し、磁性体の磁化によって時間反転対称性を破ることで、無磁場下での超伝導ダイオード効果を実現することに成功した。これにより、無磁場下で超伝導ダイオード効果を利用できるばかりでなく、磁性体の磁化の向きによる超伝導ダイオードの極性制御が可能となった。また、磁性体の磁化の向きによる超伝導ダイオードの極性制御が可能ということは、磁性体の磁化を利用した不揮発メモリ機能を超伝導ダイオードに付加できることを意味する。

研究代表者らは、超伝導臨界電流に対するダイオード効果を見出したが、研究代表者らの想定する超伝導ダイオード効果のシナリオが正しければ、超伝導が破壊される臨界磁場の大きさも電流方向に依存する超伝導臨界磁場の非相反効果が存在するはずである。この超伝導臨界磁場の非相反効果を実証し論文報告をおこなった (Appl. Phys. Express 14, 073003)。さらに、この研究の中で超伝導臨界電流の非相反性が外部磁場の大きさに対して振動するという現象を実験的に見出し、論文報告した (Appl. Phys. Express 15 113001 (2022))。さらに、この振動の起源を説明する理論を構築し計算結果が実験結果を説明可能であることを示した (Phys. Rev. B 109, 094501 (2004))。

研究代表者らの見出した超伝導ダイオード効果は、時間反転対称性を破るための外部磁場を必要とするが、超伝導人工格子に磁性体である Co を導入し、Co の磁化によって時間反転対称性を破ることで、無磁場下での超伝導ダイオード効果を実現することに成功した (Nat. Nanotechnol. 17, 823 (2022))。さらに、超伝導ダイオード効果の起源がスピン軌道相互作用によるラッシュバ分裂と磁性層からの交換結合であると考え、スピン軌道相互作用の大きい Pt と交換結合相互作用が大きい Fe を組み合わせた Pt/Fe/Pt 層を導入することで、ゼロ磁場で大きな超伝導ダイオード効果を得ることに成功した (Adv. Mater., 2304083 (2023))。

これらの成果により、無磁場下で超伝導ダイオード効果を利用できるばかりでなく、磁性体の磁化の向きによる超伝導ダイオードの極性制御が可能となった。磁性体の磁化の向きによる超伝導ダイオードの極性制御が可能ということは、磁性体の磁化を利用した不揮発メモリ機能を超伝導ダイオードに付加できることを意味し、書き換え可能な超伝導論理回路が開発可能となったといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Narita Hideki, Ishizuka Jun, Kawarazaki Ryo, Kan Daisuke, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Shimakawa Yuichi, Ognev Alexey V., Samardak Alexander S., Yanase Youichi, Ono Teruo	4. 巻 17
2. 論文標題 Field-free superconducting diode effect in noncentrosymmetric superconductor/ferromagnet multilayers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 823 ~ 828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-022-01159-4	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

1. 著者名 Kawarazaki Ryo, Narita Hideki, Miyasaka Yuta, Ikeda Yuhei, Hisatomi Ryusuke, Daido Akito, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Yanase Youichi, Ognev Alexey V., Samardak Alexander S., Ono Teruo	4. 巻 15
2. 論文標題 Magnetic-field-induced polarity oscillation of superconducting diode effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 113001 ~ 113001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac99b9	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

1. 著者名 Ando Fuyuki, Kawarazaki Ryo, Naritsuka Masahiro, Kasahara Yuichi, Miyasaka Yuta, Narita Hideki, Kan Daisuke, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Shimakawa Yuichi, Matsuda Yuji, Ono Teruo	4. 巻 60
2. 論文標題 Investigation of the upper critical field in artificially engineered Nb/V/Ta superlattices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 060902 ~ 060902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abfdc1	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 Miyasaka Yuta, Kawarazaki Ryo, Narita Hideki, Ando Fuyuki, Ikeda Yuhei, Hisatomi Ryusuke, Daido Akito, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Yanase Youichi, Ono Teruo	4. 巻 14
2. 論文標題 Observation of nonreciprocal superconducting critical field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 073003 ~ 073003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac03c0	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 Narita Hideki、Ishizuka Jun、Kan Daisuke、Shimakawa Yuichi、Yanase Youichi、Ono Teruo	4. 巻 35
2. 論文標題 Magnetization Control of Zero Field Intrinsic Superconducting Diode Effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202304083	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Teruo Ono
2. 発表標題 Superconducting Diode Effect in Rashba Superlattice
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruo Ono
2. 発表標題 Superconducting diode effect in Rashba superlattice
3. 学会等名 The 6th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 5th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruo Ono
2. 発表標題 Superconducting Diode Effect in Rashba Superlattice
3. 学会等名 Oxide Superconducting Spintronics Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruo Ono
2. 発表標題 Superconducting diode effect in Rashba superlattice
3. 学会等名 6th International Symposium on Frontiers in Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruo Ono
2. 発表標題 Superconducting Diode Effect in Rashba Superlattice
3. 学会等名 35th International Symposium on Superconductivity (ISS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳瀬陽一
2. 発表標題 局所反転対称性のない結晶構造の超伝導
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野輝男
2. 発表標題 超伝導ダイオード効果
3. 学会等名 WPI-MANA Virtual City of Workshops 「超伝導物質、トポロジカル物質」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田秀樹
2. 発表標題 極性ハイブリッド超伝導多層膜における非相反臨界電流の磁化制御
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田秀樹
2. 発表標題 極性構造を持つ超伝導/強磁性多層膜における超伝導ダイオード効果
3. 学会等名 NanospecFY2021mini
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田秀樹
2. 発表標題 超伝導/強磁性多層膜における超伝導ダイオード効果
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原崎諒
2. 発表標題 超伝導ダイオード効果の磁場誘起極性反転
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~onoweb/>
<https://www.kuicr.kyoto-u.ac.jp/sites/>

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
研究分担者	柳瀬 陽一 (Yanase Yoichi) (70332575)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	

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
---------	---------