

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2025 年 10 月 27 日

氏名 小野 輝男
所属 京都大学化学研究所
職位 教授

1. 申請研究の題目

超伝導ダイオード効果のメカニズム解明と応用展開

2. 研究の目的

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)) (Nature 584, 373 (2020))。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。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。

本研究の目的は、研究代表者らが見出した超伝導ダイオード効果のメカニズム解明と応用展開である。図1で使用した素子では、超伝導ダイオード効果を得るために外部磁場の印加が必要であるが、応用上は無磁場でダイオード効果が得られる方が好ましい。研究代表者らは、既に、強磁性 Co 層を挿入した超伝導ダイオード素子によって無磁場での超伝導ダイオード効果を得ることに成功している(Nature Nanotechnology 17, 823 (2022))。超伝導ダイオード効果の周波数依存性等を研究することで、超伝導ダイオード効果のメカニズムを解明するとともに、超伝導ダイオード効果の特性限界を評価し、整流素子や論理回路などへの応用展開を図る。

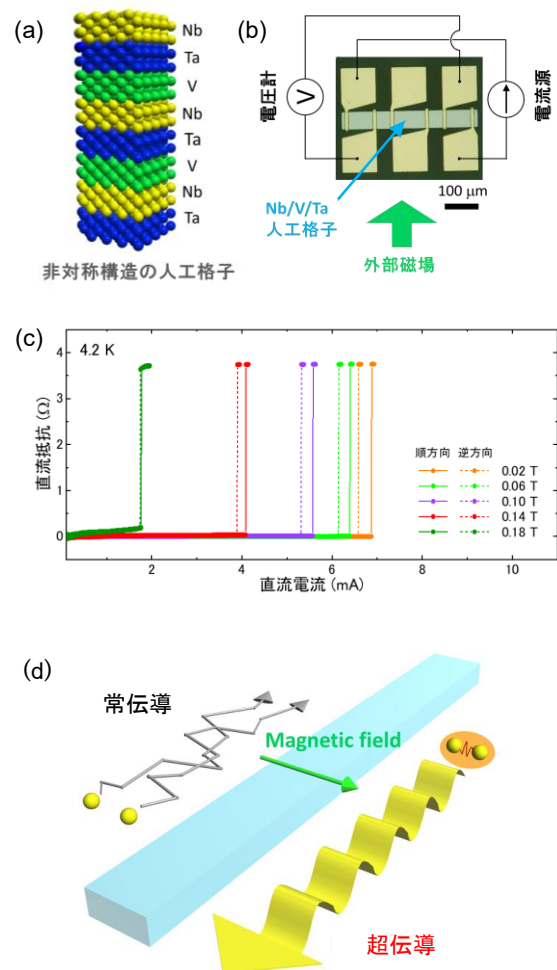


図 1 (a) 非対称構造 Nb/V/Ta 人工格子の概念図 (b) 試料の光学顕微鏡図と 4 端子電気抵抗測定の実験配置 (c) 磁場中での抵抗の測定電流方向依存性(順方向(実線)、逆方向(点線)) (d) 超伝導ダイオード効果の概念図

3. 研究の内容

図2は図1の素子に交流電流を印加した際の直流電圧測定結果である(J. Magn. Soc. Jpn., 47, 128 (2023))。素子が超伝導ダイオード効果を示す磁場と電流の範囲で整流電圧が得られている。

図2で使用した素子では、超伝導ダイオード効果を得るために外部磁場の印加が必要であるが、応用上は無磁場でダイオード効果が得られる方が好ましい。研究代表者らは、強磁性 Co 層を挿入した超伝導ダイオード素子によって無磁場での超伝導ダイオード効果を得ることに成功した(Nature Nanotechnology 17, 823 (2022))。しかし、この際の超伝導ダイオード効率(正負電流の臨界電流の差/平均臨界電流)は図1とほぼ同じ10%程度であった。図3は強磁性層として Pt/Fe/Pt 層を挿入した結果であり40%を超える大きな効率が得られた(Adv. Mater., 35, 2304083 (2023))。Pt/Fe/Pt 層を挿入した試料に対して超伝導ダイオード効果の Pt 層厚依存性を測定したところ、超伝導ダイオード効果の大きさが Pt 層厚で振動する興味深い結果が得られた(J. Magn. Soc. Jpn., 49 (2025), doi.org/10.3379/msjmag.2511R001)。

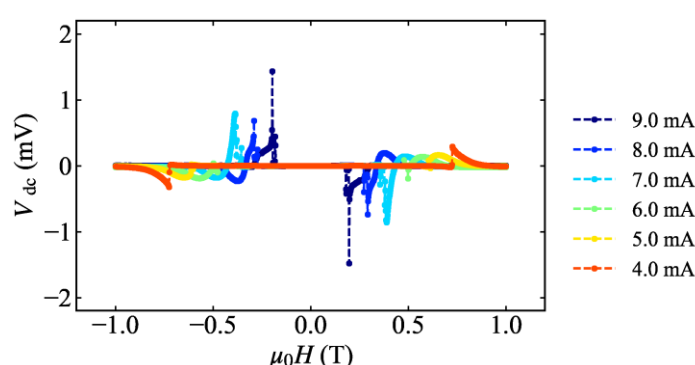


図2 超伝導ダイオード素子の整流特性評価

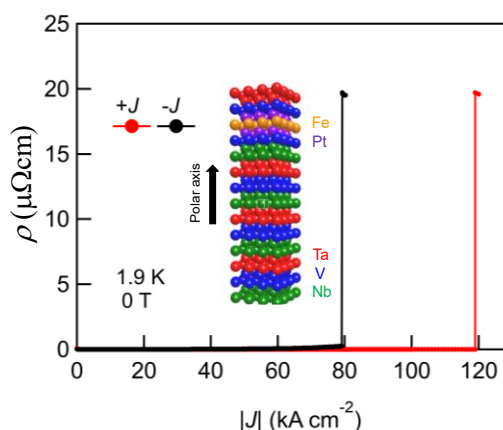


図3 Pt/Fe/Pt 層を挿入した試料の超伝導ダイオード効果

4. 研究の成果と結論、今後の課題

超伝導ダイオード効果の研究は始まったばかりであり、そのメカニズム解明や応用可能性の検討を含めて、様々な課題が残されている。図3に示した磁化方向でダイオード極性が決まる不揮発性超伝導ダイオード素子の超伝導回路への応用についても検討も行ったが、素子を室温にすると磁化方向が不安定となる問題が生じたために、現在素子構成の検討を行っている。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

申請者らの報告(Nature 584, 373 (2020))が既に600の引用があるように、本研究は既に大きな波及効果を及ぼしている。ジョセフソン接合系での超伝導ダイオード効果も観測され(C. Baumgartner et al., Nat. Nanotechnol. 17, 39 (2022); K-R. Jeon et al., Nat. Matter. 21, 1008 (2022))、グラフェンを代表とする二次元物質群への展開も急速である(H. Wu et al., Nature 604, 653 (2022); J.J. Lin et al., Nat. Phys. 18, 1221 (2022))。究極の構造である単一原子によるジョセフソン接合における超伝導ダイオード効果も観測されている(M. Trahms et al., Nature 615, 628 (2023))。多層構造による反転対称性の破れと磁性による時間反転対称性の破れを組み合わせることで新規な超伝導体を創成する点は、新たな物質創成手法の開拓という点からも学術的意義が大きい。

5-2. 社会的価値

図3に示すような大きな超伝導ダイオード効果を示す不揮発性超伝導ダイオード素子は、将来、整流素子や論理回路への応用展開が期待され、量子コンピュータをはじめとする将来の超伝導回路一般

への大きなインパクトが期待される。

6. 研究成果

・「研究論文(原著)」

○F. Tokoro, H. Narita, R. Kawarazaki, R. Iijima, R. Hisatomi, S. Karube, Y. Shiota, T. Ono, “Pt Thickness Dependence of Superconductivity in Fe/Pt-Inserted Nb/V/Ta Superconducting Superlattices”, Journal of the Magnetism Society of Japan 49, (2025),
doi.org/10.3379/msjmag.2511R001

・「国際会議発表」

- (1) Teruo Ono, “Superconducting diode effect”, 9th International Conference on Superconductivity and Magnetism and 2nd International Conference on Quantum Materials and Technologies, Liberty Lykia Hotel, Oludeniz-Fethiye, Turkiye, April 27, 2024 (招待講演、プレナリー講演)
- (2) Teruo Ono, “Superconducting diode effect in superconductor/ferromagnet multilayers”, 25th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2024), Perugia, Italy, July 7, 2024 (招待講演)
- (3) Teruo Ono, “Superconducting diode effect”, International Research School and Workshop on Electronic States and Phases Induced by Electric or Optical Impacts, L’ Institut d’ Etudes Scientifiques de Cargèse, Corsica, France, August 28, 2024 (招待講演)
- (4) Teruo Ono, “Superconducting diode effect”, 2025 MRS Spring Meeting & Exhibit, EL07: Superconducting Materials, Seattle Convention Center, Seattle, USA, April 8, 2025 (招待講演)
- (5) Teruo Ono, “Superconducting diode effect”, SPIN Galapagos 2025, Charles Darwin Convention Center, San Cristobal Island, Galápagos, Ecuador, May 30, 2025 (招待講演)
- (6) Teruo Ono, “Superconducting diode effect in metallic multilayers”, 12th International Symposium on Metallic Multilayers, Leeds, UK, July 18, 2025 (招待講演、プレナリー講演)
- (7) Teruo Ono, “Superconducting diode effect”, The 4th Spin Summit workshop, Guiyang, Guizhou Province, China, August 9, 2025 (招待講演)
- (8) Teruo Ono, “Superconducting diode effect”, MANA International Symposium 2025 “Quantum and Thermal Materials”, NIMS, Tsukuba, Japan, October 17, 2025 (招待講演、プレナリー講演)

・「受賞」

- (1) Teruo Ono, AUMS award, Asian Union of Magnetism Societies, September 17, 2024
- (2) K. Taga, R. Hisatomi, R. Sasaki, H. Komiyama, H. Matsumoto, H. Narita, S. Karube, Y. Shiota, and T. Ono, MSJ Distinguished Paper Award, September 17, 2025

以上