

一方向にのみ電気抵抗がゼロとなる超伝導ダイオード効果を発見

—エネルギー非散逸な電子回路の実現に向け期待—

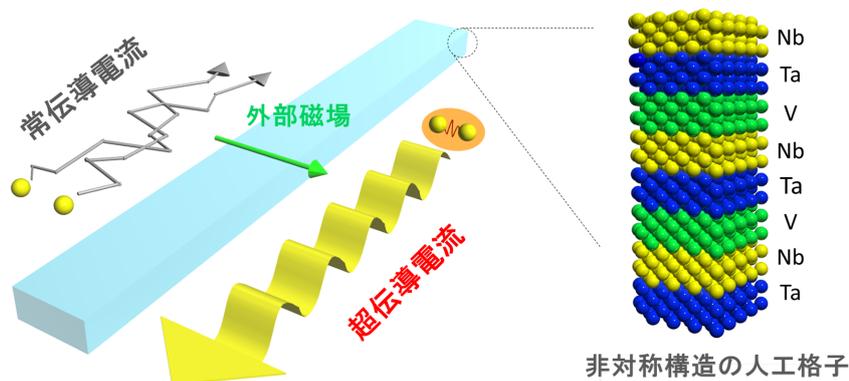
概要

京都大学化学研究所の小野輝男 教授、安藤冬希 同博士課程学生（研究当時）らの研究グループは、同大学理学研究科の柳瀬陽一 教授、大阪大学理学研究科の荒川智紀 助教らと共同で、非対称構造を有する超伝導人工格子において、一方向にのみ電気抵抗がゼロとなる超伝導ダイオード効果を初めて観測しました。

ダイオードとは、順方向に電流をよく流す一方で逆方向にはほとんど流さない特性を持つ素子であり、整流器・混合器・光検出器など数多くの電子部品に半導体ダイオードが利用されています。しかしながら、半導体の電気抵抗はゼロでない有限の値を持つため、各部品におけるエネルギー損失の問題が避けられません。そこで、半導体ではなく電気抵抗ゼロの超伝導体にダイオードの特性を付与すること、即ち超伝導ダイオードの実現が望まれていました。

本研究では、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超伝導人工格子において、臨界電流の大きさが電流方向に依存することを発見し、超伝導ダイオード効果を実証しました。本成果は、エネルギー損失の極めて小さい電子回路の実現へ貢献することが期待されます。

本研究成果は、2020年8月20日に国際学術誌「Nature」にオンライン公開されました。



ポイント

- 物質中の空間反転対称性の破れに起因した非相反電荷輸送現象は、ダイオード素子として電子回路を構成する様々な部品に応用されていますが、これまで超伝導物質における報告例はほとんどありませんでした。
- 本研究は、薄膜積層方向に非対称構造を有する Nb/V/Ta 超伝導人工格子において、外部磁場および電流の方向によって超伝導-常伝導スイッチングができること（超伝導ダイオード効果）を実証しました。
- 本研究成果により、エネルギー損失の極めて小さい電子回路の実現に向けて、空間反転対称性の破れた新規超伝導体の研究がさらに活性化すると期待されます。

1. 背景

物質中に空間反転対称性の破れ^{注1}が存在するとき、電流の非線形応答によって非相反電荷輸送^{注2}が生じます。その代表的な応用例として半導体ダイオードが挙げられますが、半導体は有限の抵抗を持っているために各部品におけるエネルギー損失が問題となります。従って、ある特定の方向においてのみ抵抗がゼロとなるような超伝導ダイオードの実現が望まれていました。しかしながら、これまでの超伝導体^{注3}における報告例においては、抵抗が有限の領域でしか非相反性が観測されていませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究では、空間反転対称性の破れた超伝導体として、Nb、V、Ta から成る人工格子^{注4}をスパッタ法で成膜しました。この薄膜試料を細線形状に加工し、図 1 (a) のような電流源と電圧計を用いた実験配置で 4 端子電気抵抗測定を行いました。薄膜面内かつ電流と直交する方向に外部磁場を印加し、電気抵抗の直流電流依存性を調査した結果を図 1 (b) に示します。その結果、Nb/V/Ta 人工格子の臨界電流^{注5}が印加電流の方向によって異なることが明らかになりました。また、順方向（実線）と逆方向（点線）の臨界電流の大小関係は、外部磁場の符号によって決まることが分かりました。

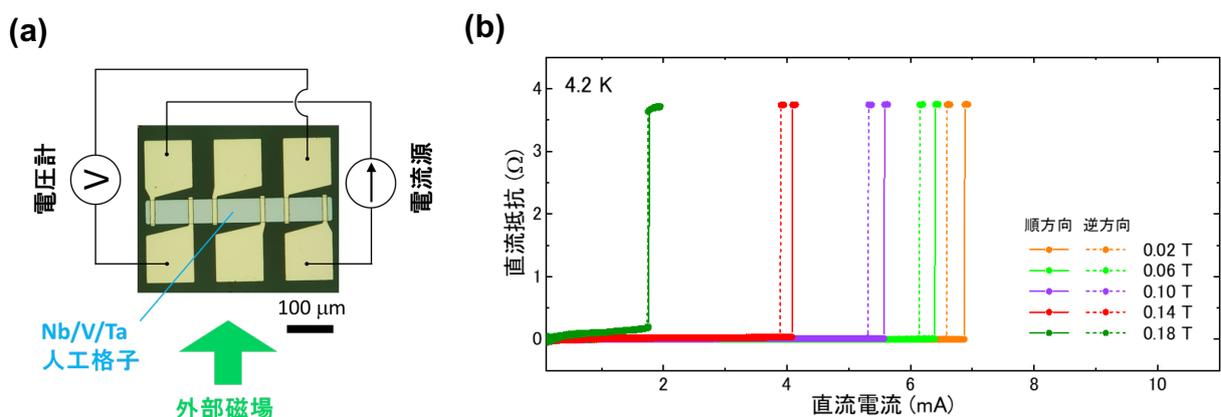


図 1 (a) Nb/V/Ta 人工格子を用いた試料の光学顕微鏡図と 4 端子電気抵抗測定の実験配置。空間反転対称性が破れているのは薄膜積層方向であり、印加電流および外部磁場とそれぞれ互いに直交している。(b) 温度 4.2 K で測定した抵抗の直流電流依存性。ある閾電流値（臨界電流）で超伝導が破壊されて有限の抵抗が発生するが、順方向（実線）と逆方向（点線）で臨界電流が異なっている。順方向と逆方向の臨界電流の大小関係は、外部磁場の符号によって決まっている。

次に、この非相反的な臨界電流を利用し、電流方向および磁場方向に応じて超伝導—常伝導スイッチングできることを実証しました（図2）。これは、Nb/V/Ta 人工格子が超伝導ダイオードとして機能することを意味します。0.02 T（テスラ^{注6}）という比較的小さな磁場でダイオードの方向を切り替えることが可能です。今回観測された一連の非相反現象は、薄膜積層方向の空間反転対称性の破れによる効果であると考えられます。

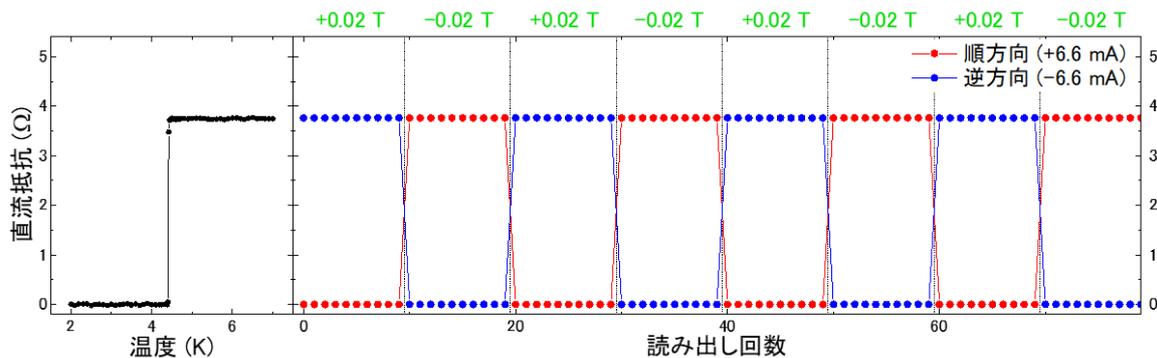


図2 電流方向および磁場方向による超伝導—常伝導スイッチングの例(4.2 K)。直流抵抗の温度依存性から、Nb/V/Ta の転移温度が 4.4 K、常伝導抵抗が 3.8 Ωであることが分かる。外部磁場 0.02 T、電流値 6.6 mA でそれぞれ符号を反転することによって、超伝導状態と常伝導状態をスイッチングできることが実証された。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で観測された超伝導ダイオード効果は、エネルギー非散逸かつ方向制御可能な電荷輸送技術の確立に向けて大きく貢献します。今後は、高感度な検出器や低エネルギー散逸の周波数混合器などといった電子回路への応用の観点から、より詳細なダイオード性能評価および物質探索が行われると考えられます。一方で、臨界電流の非相反性のメカニズムについては今なお不明瞭な点が多く残されており、実験と理論の両面からアプローチして解明することが求められています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、科研研究費補助金「特別推進研究」、「基盤研究 (S)、(A)、(B)」、「若手研究 (A)」、「挑戦的研究 (萌芽)」、「新学術領域研究：ナノスピン変換科学、多極子伝導系の物理、トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」、スピントロニクス学術研究基盤連携ネットワーク、京都大学化学研究所共同利用・共同研究拠点の助成を受けて行われました。

<用語解説>

注1 空間反転対称性の破れ：3次元の空間座標(x, y, z)を $(-x, -y, -z)$ に変換する操作のことを空間反転と呼び、この操作を施したときに元の状態と変わらないことを「空間反転対称性がある」と表現します。一方で、空間反転によって元とは異なる状態となることを「空間反転対称性の破れ」と言います。

注2 非相反電荷輸送：電流の2次の非線形効果により、電流方向の正負で異なる抵抗値や倍周波の出力信号が現れる現象のこと。今回の場合、物質中を流れる電流に対して垂直方向に空間反転対称性の破れと外部磁場が存在することによって、非線形効果が生じていると考えられます。

注3 超伝導：電子間に働く引力相互作用によって電子がクーパー対を形成し、量子力学的に凝縮する現象のこと。超伝導状態では電気抵抗がゼロとなり、エネルギー散逸がなくなります。

注4 人工格子：成膜技術を用いて複数の種類の原子を繰り返し積層し、人工的に作製された結晶格子のこと。本研究では Nb, V, Ta を用いた ABC 構造を採用しています。ABCABC...という積層構造は空間反転によって CBACBA...という非等価な構造となるため、ABC 構造の人工格子は積層方向に空間反転対称性が破れています。

注5 臨界電流：電流は波動関数の空間的な位相ずれを与えるため、位相秩序である超伝導を破壊する臨界電流が存在します。量子渦の運動など様々な要因が臨界電流に影響を与えます。

注6 テスラ：磁場の強さ（磁束の密度）を表す単位であり、T と表記されます。身近にあるような磁石の表面からは、0.1～1 T 程度の磁場が発生しています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Observation of superconducting diode effect（超伝導ダイオード効果の観測）

著者：Fuyuki Ando, Yuta Miyasaka, Tian Li, Jun Ishizuka, Tomonori Arakawa, Yoichi Shiota, Takahiro Moriyama, Yoichi Yanase, and Teruo Ono

掲載誌：Nature DOI：10.1038/s41586-020-2590-4