

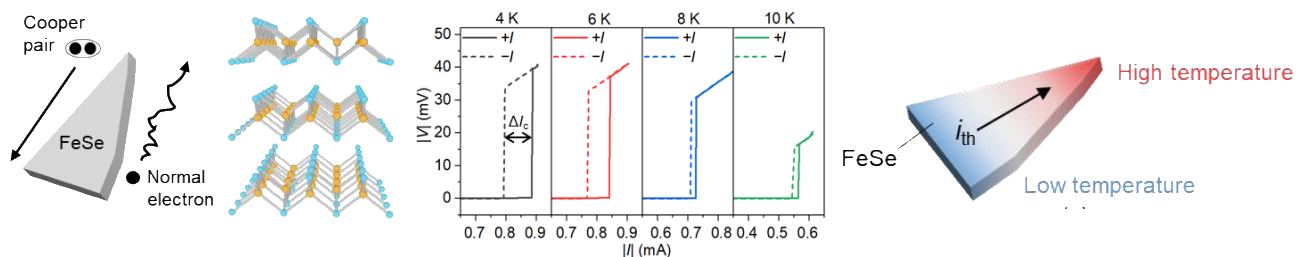
超伝導ダイオード効果の新しい背景学理を発見 ～超省電力な情報回路の実現に大きく前進～

概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の永田歌寧 修士課程学生、白石誠司 教授らのグループは京都大学大学院理学研究科の柳瀬陽一 教授、松田祐司 教授らと共同で、超低消費な情報回路の構築のために強力な武器となる超伝導体が示すダイオード（整流）効果^{*1}に関する新しい背景学理を発見しました。

超伝導ダイオード効果は 2020 年に京都大学の研究グループによって発見^{*2}された新しい効果であり、超伝導体に電流を流す際に、電流を流す方向によって抵抗がゼロの超伝導状態になったり抵抗が有限の常伝導状態になったりする効果を言います。つまり、on と off の 2 値状態をゼロ抵抗である超伝導体 1 つで実現できるため、将来的にこの効果を活かした超省電力な情報回路の実現に期待が集まっています。従来、この効果を発現させるためには、超伝導体の構造的な空間反転対称性^{*3}が破れていることと外部磁場の印加の双方が必要であるとされてきました。今回、白石教授らは FeSe（セレン化鉄）という超伝導体を用いて超伝導ダイオード効果の研究を行う中で、物質の持つ熱電効果^{*4}とそれに伴う素子内部の熱勾配が超伝導ダイオード効果をもたらすことを発見し、従来この効果の発現に必要とされてきた明示的な空間反転対称性の破れも外部磁場も不要であることを明らかにしました。この成果は、現在大きな関心を集めているこの超伝導ダイオード効果という現象の物理的理解を大きく進めるだけでなく、外部磁場が不要でコンパクトかつ超低消費な情報素子および回路の実現に大きく前進した点で極めて重要な成果です。

本成果は 2025 年 6 月 12 日（現地時間）に、米国学術誌「*Physical Review Letters*」誌にオンライン掲載されました。



(左)実験で用いた FeSe 素子の概念図と結晶構造。(中)実験で観測した超伝導ダイオード効果。外部磁場は一切印加していない。電流を+方向に流すときと-方向に流すときで超伝導状態が現れる電流の大きさが異なる。(右)実験で用いた FeSe 素子内部の温度分布の模式図。素子幅が狭いほうの電流密度が上がるために温度が高くなり、素子中の温度が均一にならないことで超伝導状態が現れる電流の大きさが異なる。

1. 背景

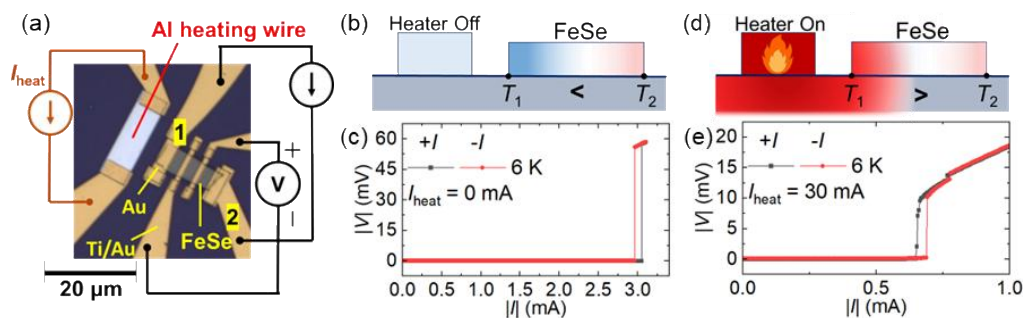
オランダの H.K. Onnes は 1911 年にヘリウムを液化する研究の過程で抵抗がゼロになる超伝導という現象を発見しました。爾来 100 年以上、超伝導という現象は物質科学における多くの研究者を魅了し続けており、様々な超伝導に絡んだ物理現象が発見されています。

今回我々が研究対象とした効果は超伝導ダイオード効果です。この効果は 2020 年に京都大学化学研究所の小野教授のグループが発見した新しい効果であり、現在世界的に最も活発に研究されている新しい超伝導現象の 1 つです。この効果は超伝導状態に電流を流したときに抵抗ゼロの超伝導状態から抵抗が有限な常伝導状態に状態が遷移するための電流（臨界電流）が、電流を流す方向によって異なる、というユニークな性質を持ちます。この現象は、1 つの素子内部で電流の流れやすさが異なるという点ではダイオード効果とみなすことができ、一方で超伝導状態と常伝導状態をそれぞれ on と off と定義することでスイッチング効果とみなすこともできるため、抵抗ゼロで消費電力もゼロである新しい情報素子として活用することが可能な現象です。

この効果は従来、超伝導体そのものの構造的な空間反転対称性が破れていることと外部磁場の印加の双方が同時に必要だと考えられてきました。しかし近年、爆発的にこの現象の研究が進む中で、外部磁場の印加は必ずしも必要でないと理解できる研究成果も発表されてくるなど、この現象を支配する背景学理が明確でない、という問題がありました。

2. 研究手法・成果

今回、我々は超伝導体として FeSe という、その熱電係数が大きな層状物質を選び、この物質の中で発現する超伝導ダイオード効果について詳細を調べました。実験結果として、前ページにも示したように外部磁場を一切印加しない場合でも明瞭な超伝導ダイオード効果が現れることを見出しました。熱電係数が大きな物質は、その物質内部の微小な熱勾配によって電流を誘起することができるため、FeSe の有するこの特徴を活かすことでその起源を明らかにすることができます。下図はその結果ですが、素子の外部に熱源となるヒーターを設置し、そのヒーターを on にしたときと off にしたときで超伝導ダイオード効果がどのように変化するかを観測したところ、電流を+方向に流すときと-方向に流すときで効果の符号が変化する（赤線のデータと黒線のデータの傾向が逆になる）ことを突き止めました。これは素子内部の熱勾配の変化で超伝導ダイオード効果を制御できることを意味し、外部磁場がない場合でも確かに超伝導ダイオード効果が現れること、FeSe は空間反転対称性の破れを内在しないことから従来理解における空間反転対称性の破れは不要であること、また素子に用いる物質の熱電係数の大きさがこの超伝導ダイオード効果における重要な物理パラメータであることを意味しています。



（左）実験に用いた FeSe 素子の光学顕微鏡像。素子外部にヒーターをつけている。（中）ヒーター電源を off にした状態での実験結果。FeSe の右側が暖かい状態になっており、超伝導から常伝導に変化する臨界電流は+I のほうが大きい。（右）ヒーター電源を on にした状態での実験結果。ヒーターの効果によって FeSe

の左側が暖くなり、その結果、超伝導から常伝導に変化する臨界電流の大きさが逆転している（-I のほうが大きい）。

3. 波及効果・今後の予定

今回の成果により、外部磁場を使わないコンパクトな超伝導ダイオード素子を作れることが実証されました。また物質の熱電特性が重要であるという未知の原理の発見にも成功しました。今後は我々が発見したこの背景学理を援用した超低消費電力情報素子および回路の試作に挑戦していきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金・挑戦的研究（開拓）「スピン計測技術を基軸とするトポロジカル超伝導とマヨラナ励起状態の探索」、同「クーパー対スピン流計測の挑戦」の支援を受けました。

<用語解説>

※1 ダイオード効果：電流が流れる方向によって流れやすさが変わる効果の総称です。一般的に電気回路における整流素子や半導体レーザー素子でこの効果が使われます。

※2 2020 年に京都大学の研究グループによって発見：京都大学化学研究所の小野輝男教授らによって発見されました。かれらは超伝導体として Ni、V、Ta の 3 つを選び、この順番で積層した構造を用いました。これは後述する空間反転対称性の破れを意味します。というのも[A/B/C/A/B/C...]の順番で積層した場合、上からみた場合と下からみた場合で積層が異なるからです（[A/B/C/B/A]だと同じ積層になります）。さらに彼らの実験では外部磁場を素子に印加することで超伝導ダイオード効果が発現しています。

※3 空間反転対称性：物質を観察する方向によって原子の位置や積層の順番が異なる場合に「空間反転対称性が破れている」と呼びます。

※4 熱電効果：物質の両端に温度差をつけたときに、暖かいサイドには電子が多く励起され、それによって暖かいほうから冷たいほうに電子が流れていきます。これがゼーベック効果と呼ばれる現象ですが、これに類似する、物質中の温度差による効果の総称を熱電効果と呼びます。

<研究者のコメント>

「大学院生たちの自由な発想からこの研究テーマはスタートしました。メンバーが知恵を絞った結晶がこのような大きな成果に結実してとても嬉しく思っています。これからも意外性と創造性を大事にしてワクワクする研究を推進していきたいと思っています。」（白石誠司）

「FeSe における超伝導ダイオード効果は一見すると空間反転対称性と時間反転対称性が共に保たれた系で起きていた現象だったので、効果の発見当初は興味深かった一方でとても不可解だと感じていました。ですが再現実験や対照実験を何度も繰り返したことでこの系における非平衡な対称性の破れの存在に気づくことができ、最終的に超伝導ダイオード効果の新たな発現原理を発見するに至れたことがとても嬉しく思います。」（永田歌寧）

< 論文タイトルと著者 >

“Field-free superconducting diode effect in layered superconductor FeSe”

(層状超伝導体 FeSe における外場の必要ない超伝導ダイオード効果)

U. Nagata¹, M. Aoki^{1,2,%}, A. Daido³, S. Kasahara⁴, Y. Kasahara^{3,#}, R. Ohshima^{1,2}, Y. Ando^{1,2,\$}, Y. Yanase³, Y. Matsuda³ and M. Shiraishi^{1,2}

1. 京都大学大学院工学研究科, 2. 京都大学 CSRN, 3. 京都大学大学院理学研究科, 4. 岡山大学大学院理学研究科

% 現所属：Catalan Institute for Nanoscience and Nanotechnology, Spain

現所属：九州大学大学院理学研究科

\$ 現所属：大阪公立大学大学院工学研究科

掲載誌： *Physical Review Letters* DOI：10.1103/PhysRevLett.134.236703