



空間反転対称性の破れに基づく超伝導ダイオードを実現 —超伝導ナノエレクトロニクスの新機能開拓—

1. 発表者：

- 若月 良平（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程3年）
斎藤 優（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程3年）
星野晋太郎（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関理論研究グループ 特別研究員）
板橋 勇輝（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 修士課程1年）
井手上敏也（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教）
江澤 雅彦（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 講師）
岩佐 義宏（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー）
永長 直人（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長）

2. 発表のポイント：

- ◆空間反転対称性の破れた2次元超伝導体で初めて整流特性（ダイオード特性）を発見。
- ◆空間反転対称性の破れた超伝導体特有の整流特性の微視的機構を実験的・理論的に解明。
- ◆本研究成果が、超伝導ナノエレクトロニクスの新機能開拓の礎になることに期待。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の若月良平大学院生、斎藤優大学院生、同研究科の岩佐義宏教授（理化学研究所 創発物性科学研究センターチームリーダー兼任）、永長直人教授（理化学研究所 創発物性科学研究センター副センター長兼任）らの研究グループは、原子膜材料（注1）である二硫化モリブデン（ MoS_2 ）の電気二重層トランジスタ（EDLT）構造（注2）を用いて空間反転対称性の破れた2次元超伝導体では、特定の方向に磁場を加えた状況で整流特性（ダイオード特性、注3）を示すことを世界で初めて発見しました。また、超伝導揺らぎ電流（注4）の理論計算によって、常伝導相と比べて整流特性が飛躍的に大きくなることを説明し、さらに、一般に空間反転対称性（注5）の破れた超伝導体においてそのような整流特性の増大が起き得ることを示しました。こうした結果は、整流特性がエキゾチックな結晶構造が示す機能性の探索を推進させるだけでなく空間反転対称性の破れた結晶における非線形電気伝導研究という新たな学術分野を切り開き、次世代の超伝導ナノエレクトロニクス材料の機能開拓をしていく上で重要な知見を与えるものと期待されます。

本研究成果は、米国のオンライン科学雑誌『*Science Advances*』（平成29年4月21日版）に掲載されます。

4. 発表内容：

《背景》

超伝導は電気抵抗がゼロになる現象で、消費電力を発生することなく電気を流すことができます。そのため、省エネルギーにつながる次世代の技術として期待され、基礎及び応用的な面から世界中で研究されています。

特に超伝導体の集積化は、超伝導量子ビットなど次世代のコンピューティングシステムで非常に重要な役割を担うと期待されており、こうした超伝導体の集積化において超伝導ナノエレクトロニクスの新機能の開拓が広く求められています。その中でも、整流性を持つ超伝導体、すなわち超伝導ダイオードを実現することは超伝導ナノエレクトロニクスの発展の上で極めて重要になっています。こうした中、空間反転対称性が破れた常伝導体結晶では、整流性を持つことが最近の研究で明らかにある一方、空間反転対称性の破れた超伝導体の整流性の研究は今まで行われていませんでした。

《研究内容》

本研究グループは、原子膜材料の一種である層状物質、二硫化モリブデン (MoS_2) の高品質な単結晶を用いて、電界効果トランジスタの一種である EDLT 構造 (図1) を製作しました。この構造では、超強電界によって誘起された電子の集団が MoS_2 の単結晶表面に蓄積できるため、原子層1層分の厚さの、極めて薄い、究極の2次元超伝導を人工的に実現することが可能です。さらに MoS_2 では単層構造で面内の反転対称性が破れているため (図2)、EDLT によってほぼ単層でかつ空間反転対称性が破れた超伝導を実現していることとなります。

本研究では、作製した EDLT デバイスの面直方向に磁場をかけた状態での電気伝導特性を測定しました。厳密な超伝導状態では電気抵抗は完全にゼロで整流特性は観測されませんが、この超伝導体にある一定の磁場下で部分的に超伝導が壊れ電気抵抗が有限となる状態で測定を行いました。電気抵抗の倍周波成分を測定することで整流特性を調べた結果、常伝導状態では極めて小さいが、超伝導状態では極めて大きい整流特性が観測されました (図3)。さらに、この整流特性は温度を下げていくと増大することを発見しました。また、超伝導転移温度近傍において、現象論的に超伝導転移を取り扱うギンツブルグ・ランダウ理論に基づく理論解析によりこの機構を解明しました。

整流特性の飛躍的増大はフェルミエネルギー (注6) と超伝導ギャップ (注7) という二つのエネルギースケールの比から説明され、一般の空間反転対称性の破れた超伝導体でも同様の効果が起きると期待されます。

《今後の展望》

本研究では、反転対称性が破れた原子層1層分の厚さの2次元超伝導体で新しい原理の整流特性を発見し、さらに、空間反転対称性が破れた超伝導体に普遍的な現象であることを示しました。このような整流特性や電流の非線形応答は、空間反転対称性が破れた超伝導体に普遍的な現象であると考えられます。今後、さまざまな空間反転対称性の破れた超伝導体において、整流特性も含めた非線形電気伝導現象の包括的な研究・新機能性開拓が飛躍的に進展することが期待されます。

本研究成果は、対称性が破れた2次元超伝導という新たな学術分野を切り開く礎となるだけでなく、超伝導ナノエレクトロニクスの機能開拓へ向けた一歩となることが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science Advances」 (4月21日)

論文タイトル： Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors

著者： R. Wakatsuki, Y. Saito, Y. M. Itahashi, T. Ideue, M. Ezawa, Y. Iwasa, N. Nagaosa*

DOI 番号： 10.1126/sciadv.1602390

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター

教授 岩佐 義宏 (いわさ よしひろ)

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻

教授 永長 直人 (ながおさ なおと)

7. 用語解説：

注1 原子膜材料

2010年のノーベル物理学賞で有名となったグラフェンなどの2次元物質として注目されている、原子層1層あるいは数層で形成される材料。これらの物質の多くはスコッチテープ法で劈開(へきかい)し、ナノメートルスケールの厚さの薄膜を容易に製作できるため、ナノデバイスへの応用の期待が高まっている。

注2 電気二重層トランジスタ (EDLT)

日常生活の至る所に使われている電化製品の中核を担う電界効果トランジスタ (FET) の絶縁層をイオン液体と呼ばれる特殊な塩(えん)で構成される液体に置き換えたトランジスタ(図1参照)。液体の塩あるいは塩を溶かした液体の中に2つの固体電極を入れ、電極間に電圧を加えた時に液体と固体の界面にできる帯電層は電気二重層 (electric-double-layer : EDL) と呼ぶ。この電気二重層では、塩を構成している陽イオン(正の電荷を持つ)と陰イオン(負の電荷を持つ)はそれぞれ負と正の電圧が加えられている電極に引き寄せられ、最終的に電極界面に整列し、同時に電極内では、イオンとは反対の符号を持つ電荷が界面に引き寄せられている。

注3 整流特性 (ダイオード特性)

電流を流す方向が順方向か逆方向かによって抵抗の大きさが異なるという性質。代表的な例はp-n接合ダイオードであるが、結晶の場合でも空間反転対称性が破れていれば整流特性は生じ得る。

注4 超伝導揺らぎ電流

超伝導転移温度直上の有限抵抗領域においては、常伝導電流に加え、超伝導秩序変数の熱揺らぎによって電流が流れる。この超伝導揺らぎ電流は超伝導転移温度に近づくにつれ増大し、そのような領域で電流の支配的な成分となる。

注5 空間反転対称性

空間座標 (x, y, z) を $(-x, -y, -z)$ に移すような変換のことを空間反転と呼び、そのような変換を施しても不変であるとき、空間反転対称性があると言う。整流特性を持つためには空間反転対称性が破れている必要がある。

注6 フェルミエネルギー

金属中の電子は低いエネルギー準位に詰まっているが、占有された準位の中で最高のエネルギーのこと。

注7 超伝導ギャップ

超伝導状態において生じるエネルギーギャップのこと。

8. 添付資料：

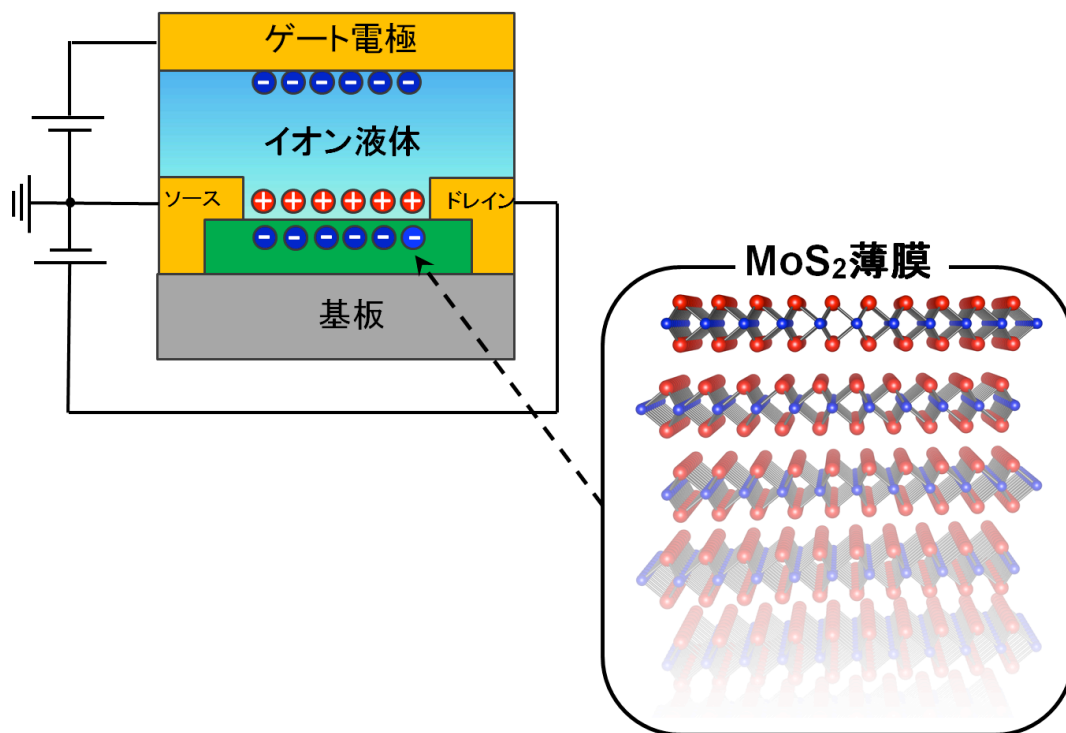


図1 ニ硫化モリブデン MoS_2 を用いた電気二重層トランジスタ構造

MoS_2 薄膜をトランジスタのチャンネルに用いた電気二重層トランジスタ (EDLT) のデバイス構造。本研究で用いた MoS_2 薄膜の厚さは約 20 nm。正の電圧を加えることで MoS_2 の表面（原子層 1 層分の厚さ）にのみ電子が蓄積する。

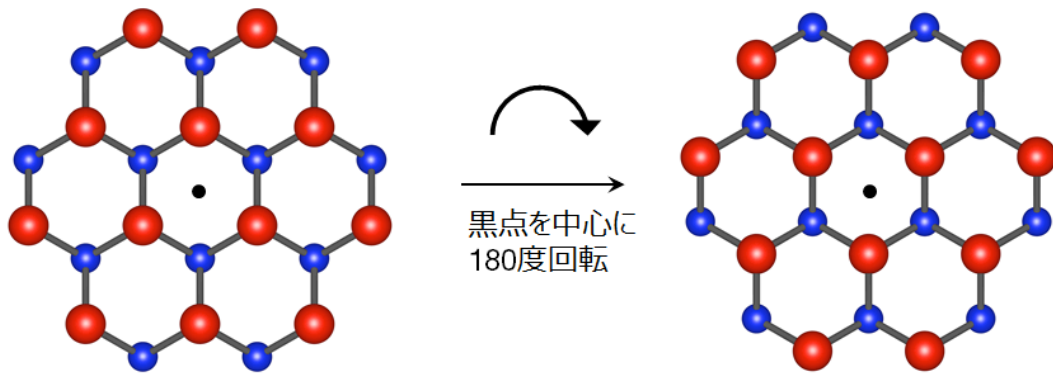


図2 MoS₂の面内方向の反転対称性の破れ

MoS₂ 1層の表面に対して垂直方向から見た様子。ある一点を中心に MoS₂表面と同じ面内で 180度回転、すなわち“反転”を行うともとの構造に一致しない。これを“反転対称性の破れ”という。

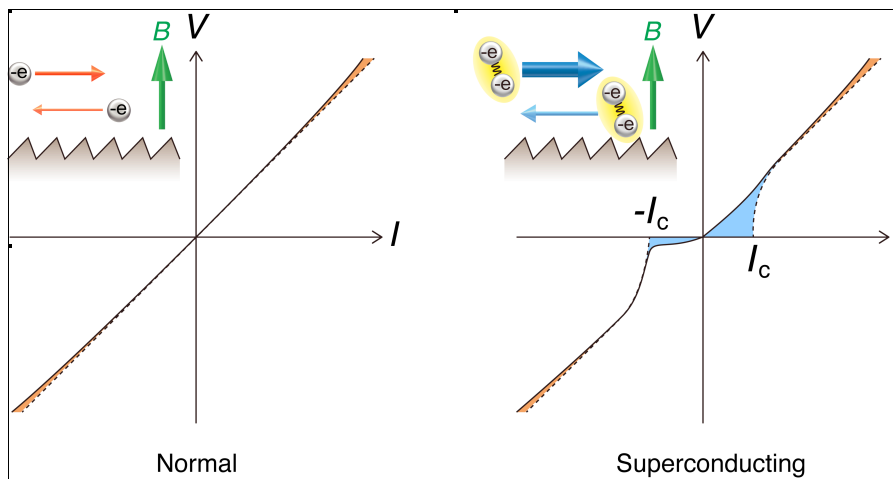


図3 左：常伝導状態、右：超伝導状態における整流特性

空間反転対称性が破れた系で特定の方向に磁場をかけると一般に整流特性が生じる (I - V 特性における非対称性) が、超伝導状態では常伝導状態と比べて飛躍的に増大する。