

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20904

研究課題名（和文）原子層結晶を用いた超伝導エーデルシュタイン効果の実証

研究課題名（英文）Demonstration of the superconducting Edelstein effect using atomic-layer crystals

研究代表者

内橋 隆（UCHIHASHI, Takashi）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・グループリーダー

研究者番号：90354331

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：エーデルシュタイン効果の起源であるスピン軌道ロック現象についてインジウム原子層を対象とした詳細な解析を行った。面内臨界磁場から求めたスピン散乱時間と試料伝導度から求めた電子弾性散乱時間がほぼ等しくなることから、スピン反転を伴う動的なスピン軌道ロック効果がこの系で本質的な役割を果たしていることを発見した。これは、従来の理論で予想されていた静的なスピン軌道ロック効果とは全く異なる機構である。また、原子層からできた10 $\mu$ m幅の微細伝導チャンネルの作製に成功し、STM測定・電気伝導測定の両方を可能とする装置の開発を行って最低到達温度0.4 K、最高印加磁場9Tを達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ラッシュバ型スピン軌道相互作用をもつ2次元超伝導体の面内臨界磁場は通常のパウリ限界を大きく超えることが、研究代表者の研究によって明らかにされていたが、その詳細な機構は未解明だった。今回スピン運動量ロックの動的な効果により時間反転対称性を保持したままスピン反転率が異常に増大することがその原因であることを明らかにした。この性質は、近年注目されている原子層厚さの2次元超伝導体の特徴的な性質の一つとして理解できる。原子層超伝導体は強い磁場や磁気相互作用と共存できるため、将来量子機能性材料として応用されることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：A detailed analysis was performed on the spin-orbit locking phenomenon that is the premise of the Edelstein effect regarding indium atomic layers. Since the spin scattering time obtained from the in-plane critical magnetic field and the electron elastic scattering time obtained from the sample conductivity are almost equal, it is understood that the dynamic spin-orbit locking effect with spin inversion plays an essential role in this system, discovered. This is a completely different mechanism from the static spin-orbit locking effect expected by the conventional theory. In addition, we succeeded in producing a fine conduction channel with a width of 10  $\mu$ m made from an atomic layer. We also developed an instrument that enables both STM measurement and electrical conduction measurement, which can operate at the lowest temperature of 0.4 K and under the maximum applied magnetic field of 9 T.

研究分野：表面科学、低温量子物性

キーワード：超伝導 スピントロニクス 原子層結晶

### 1. 研究開始当初の背景

エーデルシュタイン効果は、表面界面での空間反転対称性の破れによるラシュバ型軌道相互作用 (SOC) に起因する効果であり、非磁性体内でスピン流生成を可能とするため、大きな注目を集めていた。しかしエーデルシュタイン効果によるスピン流生成には依然として大きな駆動電流が必要であり、半導体や常伝導金属の材料を用いる限り消費電力の大幅な低下は見込めない。エーデルシュタイン効果を超伝導体において実現すればスピン流をエネルギー散逸ゼロの電流で生成できるはずである。

しかし、超伝導体を用いてエーデルシュタイン効果の検証に成功した実験は存在しなかった。実験上の重要な問題点として、同効果は空間反転対称性が破れた表面界面でのみ生じる一方で、一般的な薄膜試料を用いると表面界面では乱れの影響で超伝導状態が破壊されてしまうことがあげられる。また、表面界面では乱れが大きいため、電子散乱によって固有エネルギーに幅がつき、電子状態がぼやけてしまう。よってデバイス構造の薄膜試料界面で、ラシュバ型 SOC によりスピン分裂したフェルミ面が本当に存在するかも明確ではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、スピン流の生成源としてラシュバ型 SOC を有する 2 次元原子層結晶の超伝導体に着目する。超伝導電流によるエーデルシュタイン効果の発現を実証し、スピン流をエネルギー散逸ゼロの電流で生成できることを示す。

### 3. 研究の方法

実験の模式図を図 1 に示す。領域 A で端子 1-2 間に電流を流すと、エーデルシュタイン効果によりスピンは領域 A に蓄積され、拡散により領域 B に流入する。スピンは逆エーデルシュタイン効果を利用して電流へと変換することで、端子 3-4 で電圧として検出することが可能である。本研究では、図 1 に示したように、原子層結晶に加工を施してサブマイクロメートル幅の微細伝導チャンネルを作製する実験技術が重要な位置を占める。この目的のために、研究代表者がこれまでに開発してきたシャドーマスクとイオンビームエッチングを用いるパターニング手法を適応する。また、実験を効率よく進めるためには、同一の試料に対して STM による表面構造観察と電子輸送測定を行うことが望ましい。このための新たな装置開発も行った。

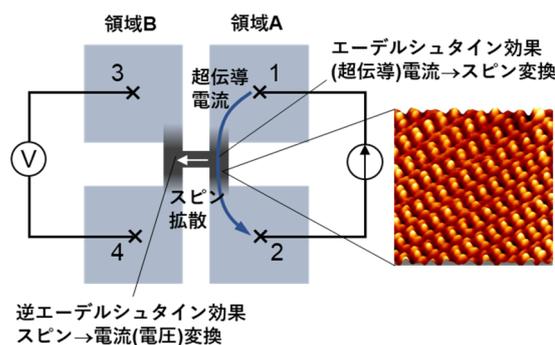


図 1 本研究における実験の模式図。右の写真はインジウム原子層超伝導体の STM 像を示す

### 4. 研究成果

#### (1) 動的なスピン軌道ロッキング効果の解明

エーデルシュタイン効果発現の起源となるスピン軌道ロッキング現象についてラシュバ型 SOC を有するインジウム原子層を対象とした詳細な解析を行った。研究代表者はインジウム原子層超伝導体の面内磁場が  $T=0$  への外挿でパウリ限界 (常磁性対破壊効果によって決まる臨界磁場) の 3 倍程度にまで増強されることを実験で観測していたが、ラシュバ型 SOC に起因する静的なスピン軌道ロッキング効果による面内臨界磁場の増強因子は理論的には  $\sqrt{2}$  と予想されており、この結果を説明できない。

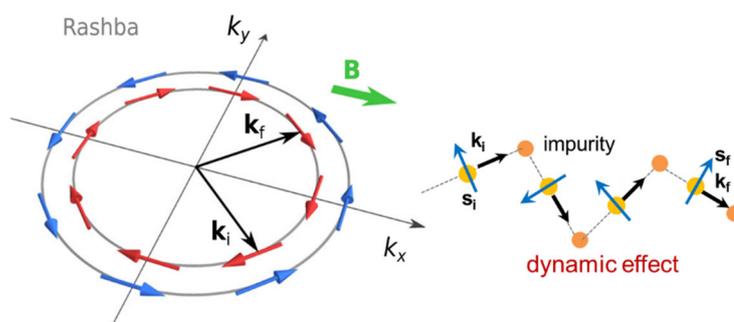


図 2 ラシュバ型 SOC により分裂したフェルミ面と動的なスピン軌道ロッキング効果を示す模式図

研究代表者は面内臨界磁場の温度依存性を定量的に解析することにより、スピン軌道散乱時間として3種類のフラット試料に対して $\tau_{so} = 86 \pm 12, 52 \pm 14, 33 \pm 18$  fsを得た。また、常伝導状態における試料面抵抗値から、同じ試料に対して電子弾性散乱時間として $\tau_{el} = 69 \pm 12, 70 \pm 12, 57 \pm 12$  fsを得た。実験誤差範囲内で $\tau_{so} \approx \tau_{el}$  が成立することから、電子が弾性散乱を受ける度にスピニングが散乱されていると結論づけた。この強制的なスピン散乱のため、面内臨界磁場はパウリ限界を大きく超えることが可能となる。すなわち、臨界磁場の異常増大はスピン軌道ロッキング効果によるものであるが、従来から考えられてきたようなスピンを一定方向に固定する静的な効果ではなく、むしろスピン散乱を増大させる動的な効果によるものであることがわかった (S. Yoshizawa et al., Nat. Commun. **12**, 1462 (2021)). 図2を参照)。

この結論は、微斜面基板を用いた試料の測定によっても支持された。この場合は $\tau_{so} \approx 2 \tau_{el}$  の関係が得られたが、これは微斜面試料では原子ステップ密度の増加により電子散乱が増えるためである。このためにフェルミ面上でエネルギー幅についてスピン分裂が抑制されるため、スピン軌道ロッキング効果が部分的に解除されると解釈できる。

### (2) 微細伝導チャンネルの作製

従来はシャドーマスクとイオンビームエッチングによって作製した伝導チャンネル幅は  $300 \mu\text{m}$  が限界であったが、集束イオンビームを利用することにより、伝導チャンネル幅を  $10 \mu\text{m}$  にまで減少させることに成功した。細い架橋部をもつシャドーマスクは試料との接触により容易に壊れてしまうが、マスクの構造を工夫することで、イオンスパッタによるパターン転写により明瞭な境界をもつ微細伝導チャンネルを作製することに成功した (図3)。今後は伝導チャンネル幅をサブミクロンにまで減少させ、スピン流の検出を行う。

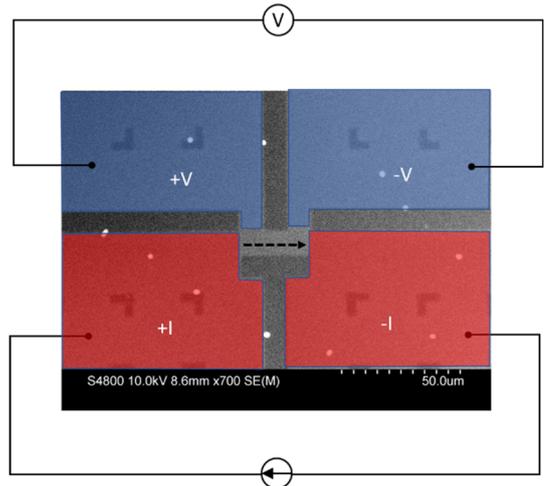


図3 微細伝導チャンネルの走査電子顕微鏡像。シャドーマスクは集束イオンビームを用いて作製した。

### (3) 極限環境対応 STM/電気伝導測定装置の開発

本研究を加速するには、同一の試料に対してSTMによる表面構造観察と電子輸送測定の両方を行う必要がある。そこで、現行の極限環境(超高真空・極低温・強磁場中)対応の電子輸送測定装置を改造して、電子輸送測定だけでなくSTM測定も同時に行うことができる装置を開発した (図4(左))。電子輸送測定のためには試料交換室において試料をカプセル型のユニットに導入してクライオスタット内に導入するが、このユニットと互換性のあるカプセル型STMヘッドを作製した (図4(右))。試料交換室においてカプセル型STMヘッド内に試料を挿入し、超高真空対応のクライオスタット内にヘッドごと挿入して冷却し、STM測定を行う。このために必要な配線を完了し、動作確認を行った。また改良後において、最低到達温度  $0.4$  K、最高印加磁場  $9\text{T}$  を達成した。

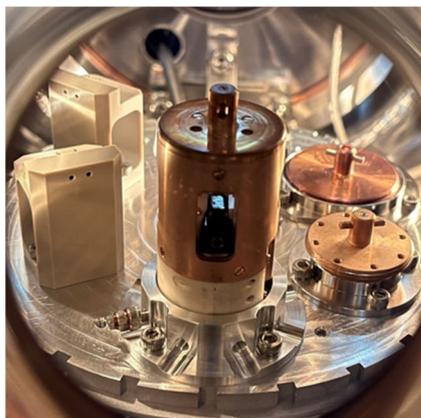


図4 (左) 試料交換室内に導入されたカプセル型STMヘッドの写真。(右) 極限環境(超高真空・極低温・強磁場中)対応の電子輸送測定装置。今回、STM測定もできるように改造した。

本装置における最高印加磁場は 5T であったが、今回 9T に引き上げられたため、電子輸送測定においてもより広範囲の磁場で実験をすることが可能になった。上述したインジウム原子層結晶の面内臨界磁場として最高 9T までの実験データを新たに取得し、パウリ限界に対する増強因子がラシュバ型 SOC を取り入れた従来理論での値 $\sqrt{2}$  を超えることを明確に示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shunsuke Yoshizawa, Takahiro Kobayashi, Yoshitaka Nakata, Koichiro Yaji, Kenta Yokota, Fumio Komori, Shik Shin, Kazuyuki Sakamoto, and Takashi Uchihashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Atomic-layer Rashba-type superconductor protected by dynamic spin-momentum locking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1462(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-21642-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahiro Kobayashi, Yoshitaka Nakata, Koichiro Yaji, Tatsuya Shishidou, Daniel Agterberg, Shunsuke Yoshizawa, Fumio Komori, Shik Shin, Michael Weinert, Takashi Uchihashi, and Kazuyuki Sakamoto	4. 巻 125
2. 論文標題 Orbital angular momentum induced spin polarization of 2D metallic bands	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 176401(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.176401	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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 横田健太、吉澤俊介、内橋隆
2. 発表標題 ラッシュバ型原子層超伝導体における動的スピン軌道運動量ロッキング効果の解明
3. 学会等名 NIMS先端計測シンポジウム 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yokota, S. Yoshizawa, T. Kobayashi, Y. Nakata, K. Yaji, F. Komori, S. Shin, K. Sakamoto, T. Uchihashi
2. 発表標題 Electron transport study of atomic layer Rashba-type superconductor
3. 学会等名 MANA Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田健太, 吉澤俊介, 小林宇宏, 中田慶隆, 矢治光一郎, 小森文夫, 辛埴, 坂本一之, 内橋隆
2. 発表標題 原子層ラシユバ型超伝導体の電子輸送研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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