

## 超伝導体／強磁性半導体接合でのゼロバイアスコンダクタンスピークの観測

赤崎 達志／NTT 物性科学基礎研究所 主幹研究員

超伝導体／強磁性体 (S/F) 接合では、超伝導と強磁性の共存により様々な量子現象が出現すると期待されている。以下では、従来型の *s* 波超伝導体を用いた S/F 接合中での超伝導と強磁性の共存を考える。F 中での有限な交換エネルギー  $h_{ex}$  を考慮すると、形成されるクーパ対は、反平行スピンの電子対で有限な重心運動量を持つか、平行スピンの電子対で重心運動量を持たない場合が考えられる。前者は、よく知られた FFLO 状態であり、F 中で対関数の振幅が正負に振動しながら減衰していく。このため S/F/S 接合では、位相差がゼロの時に安定になる通常のジョセフソン接合 (0 接合) と位相差が  $\pi$  の時に安定になる場合 ( $\pi$  接合) が出現する [1]。当初の S/F 接合に関する実験的成果は、この S/F/S 接合における 0- $\pi$  転移の観測であった。Ryazanov らは、F として小さい  $h_{ex}$  を有する CuNi を用い、F の厚さによって Josephson 電流が非単調に増減を繰り返すことから、0- $\pi$  転移していることを明らかにした [2]。同様な手法で、Kontos らも Nb/PdNi/Nb 接合で 0- $\pi$  転移を観測している [3]。しかしながら、このような現象は、F 中の対関数が  $h_{ex}$  の増大に従って指数関数的に減衰するため、弱い強磁性の場合にのみ観測可能でありせいぜい数十 nm 程度の短距離効果であった。ところが、2006 年に Keizer らにより、完全偏極しているハーフメタルの  $\text{CrO}_2$  を F として用いた S/F/S 接合において、F の長さが 0.3 ~ 0.4

$\mu\text{m}$  と十分長いにもかかわらず Josephson 電流が流れることが示された [4]。この実験結果は、FFLO 状態では説明することができず、平行スピンの重心運動量を持たないクーパ対の存在が要請される。このクーパ対の対関数は、スピン部分と軌道部分が対称であるため、2 電子の入れ替えに対して反対称であるというフェルミ統計に由来する要請を満たすためには、2 電子の時間の入れ替えによって対関数が反対称にならざるをえない。これこそ奇周波数クーパ対と呼ばれる新奇のクーパ対である。理論 [5, 6] によれば、S/F 界面近傍にバルクの F 中の磁化の向きとはノンコリニアな磁化を持つ界面層が存在し、スピン反転散乱が起きたとすると、平行スピン三重項のクーパ対が F 中に誘起されると予想されている。この平行スピン三重項のクーパ対は、交換エネルギーの影響を全く受けないため F 中奥深くまで侵入し、長距離にわたり Josephson 電流を運ぶことが可能となる。Khaire らは、F として Co を用いた S/F/S 接合に界面層として弱い強磁性体である PdNi or CuNi を導入した場合としない場合を比較し、界面層がある場合は Co 層が厚くなくても Josephson 電流が流れることを示した [7]。同様に、Robinson らは、原子層ごとに磁化が円錐の外側を沿うように回転するコニカル磁性体である Ho を界面層に用いることで、Josephson 電流の減衰が抑制されることを示している [8]。これらの実験結果は、奇周波数

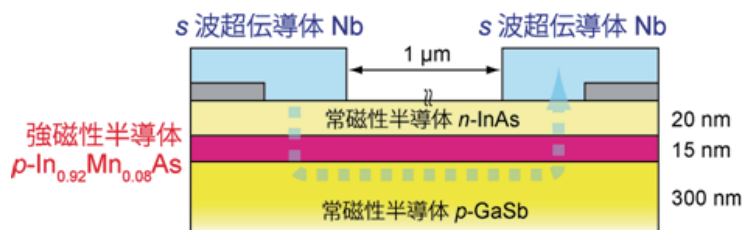


図 1: 図 1. Nb/*n*-InAs/*p*-InMnAs 接合の模式図。薄い水色の矢印は、この接合における電流の流れ方を示す。

## WEB 非公開

図 2 : Nb/*n*-InAs/*p*-InMnAs 接合の微分コンダクタンス-バイアス電圧特性の温度依存性

クーパー対の存在を強く示唆するものである。

一方、我々は奇周波数クーパー対の存在を確認する別のアプローチとして、奇周波数クーパー対が存在することによる準粒子状態密度の変化に注目している。奇周波数クーパー対が存在するならば、F 中の状態密度はゼロエネルギーにピークを持ち、その幅は Thouless energy で特徴付けられることが理論的に示されている [9]。我々は、常磁性半導体である *n*-InAs と強磁性半導体である *p*-InMnAs との二層伝導チャンネルを有する超伝導接合（図 1 参照）を作製し、状態密度が反映される微分コンダクタンスの評価を開始している。この接合では、超伝導金属と容易にオーミック接触が取れる *n*-InAs 中にスピン偏極を誘起することができると考えられる。また、*p*-InMnAs は強磁性体であると同時に半導体でもあり、金属と異なり比較的容易に電界でキャリア濃度を制御することが可能である。そのため、キャリア濃度に強く依存する磁気特性も電界によって制御できることが知られている [10]。これにより、将来的には電界によって S/N 接合を S/F 接合に転移させることが可能となり、一つの素子で強磁性に転移することによって出現する効果を抽出することができるかと期待される。図 2 に、*n*-InAs/ 強磁性 *p*-In<sub>0.92</sub>Mn<sub>0.08</sub>As 二層チャンネル超伝導接合の *dI/dV-V* 特性の温度依存性を示す。この図から、0.6 K 以下でミニギャップと考えられる微分コンダクタンスの減少とゼロバイアスコンダクタンスピーク (ZBCP) が観測されることがわかる。また、この ZBCP は、図 3 に示すよ

図 3 : ゼロバイアスコンダクタンスの温度依存性

うに 0.6 K 以下で Nb のギャップ電圧以上で求めたノーマルコンダクタンスよりも大きな値になることが分かる。この結果は、この ZBCP が S/N 接合で観測される無反射トンネリングでは説明できないことを示唆している。次に、図 4(a) にこの接合の *dI/dV-V* 特性の磁場依存性を示す。印加磁場が増大するにつれて、ZBCP とミニギャップ構造が小さくなっていくことが分かった。この実験結果は、図 4(b) に示した平行スピン三重項奇周波数クーパー対が F 中に侵入した場合に局所状態密度にゼロエネルギーピークが出現すると予想している理論計算と定性的に一致している。これらのことから、ZBCP の起源は奇周波数超伝導状態の ZEP と関連していると考えられるが、0.1 meV 程度と考えられる ZBCP の特徴的なエネルギースケールと Thouless energy との関係、平行スピン三重項奇周波数クーパー対を誘起するために必要なノンコリニアな磁化を持つ界面層の存在等、まだ未解明な部分があり、さらなる接合構造の改善、意図的な界面磁化層の挿入等を行い、これらを明らかにしていくことが今後の課題である。

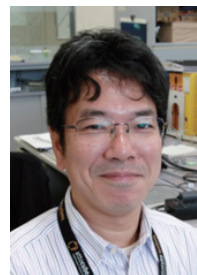
## WEB 非公開

図 4: Nb/n-InAs/p-InMnAs 接合の微分コンダクタンスーバイアス電圧特性の磁場依存性 ((a) 実験、(b) 計算<sup>[11])</sup>

## 参考文献

- [1] E. A. Demler *et al.*, Phys. Rev. B 55, 15174 (1997).
- [2] V. V. Ryazanov *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 2427 (2001).
- [3] T. Kontos *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 137007 (2002).
- [4] R. S. Keizer *et al.*, Nature 439, 825 (2006).
- [5] F. S. Bergeret *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 4096 (2001).
- [6] Y. Asano *et al.*, Phys. Rev. Lett. 98, 107002 (2007).
- [7] T. S. Khaire *et al.*, Phys. Rev. Lett. 104, 137002 (2010).
- [8] J. W. A. Robinson *et al.*, Science 329, 59 (2010).
- [9] T. Yokoyama *et al.*, Phys. Rev. B 75, 134510 (2007).
- [10] H. Ohno *et al.*, Nature 48, 944 (2000).
- [11] A. A. Golubov, Private communication.

## 著者紹介



## あかざき・たつし

1962年高知県出身、1984年九州大学理学部物理学科卒業、1986年九州大学大学院理学研究科修士課程修了、1986年NTT基礎研究所研究員、1995年博士(工学)(大阪大学)、2005年NTT物性科学基礎研究所スピントロニクス研究グループグループリーダー 現在に至る。