

## メゾスコピックなサイズの 超伝導体-常伝導体-超伝導体接合の性質

Transport properties of superconductor-  
normal metal-superconductor small tunnel junctions

代表研究者 理化学研究所 基礎科学特別研究員 神田 晶申  
Special postdoctoral researcher,  
The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)  
Akinobu KANDA

Relationship among mesoscopic phase coherence in normal metal, macroscopic phase coherence in superconductor and single-electron charging effects is experimentally studied through transport properties of normal metal (N) - superconductor (S) - normal metal (N), S-S-S and S-N-S single-electron tunneling (SET) transistors with ring-shaped central islands. In S-S-S and N-S-N SET transistors, fluxoid quantization and shift of Coulomb oscillations' phase are observed. The latter presumably comes from interaction between the superconducting phase coherence and single-electron charging effects. In S-N-S SET transistors, we observed the Coulomb blockade of Andreev reflections.

### 研究目的

量子力学的な粒子である電子は、波動性と粒子性という相反する2つの性質を合わせ持っている。

電子の波動性は、固体内の電子の振る舞いを記述する際の基本となるものであるが、特に、常伝導金属において、電子が位相情報を保って運動できる距離よりもサイズが小さな、いわゆるメゾスコピック系の試料の場合には、光波や音波で見られるのと同様な干渉の効果を観測することができる。ただし、光波や音波の場合と違って、一つの試料で電子の通る道筋の長さを実際に変えるのは困難であるので、ほとんどの場合、行路長は磁場（ベクトルポテンシャル）によって変化させる。この効果は、常伝導金属のリングにおける磁気コンダクタンスの振動

（アハロノフ・ボーム効果）として知られ、固体中における電子の干渉効果は、電子波干渉デバイスの物理として1980年代半ば以降活発に研究が行われている。また、超伝導体では、電子はマクロなサイズの試料全体にわたって位相コヒーレンスを保って運動することができ、超伝導リングにおけるフラクソイド量子化などの現象をもたらす。

一方、固体中の電子の輸送現象における電子の粒子性は、微小なトンネル接合において顕在化する。2つの金属を薄い絶縁体膜を介してつなげたトンネル接合では、電子は波動関数のしみだしによってトンネルすることができるが、接合面積が小さく電子1個のトンネルに伴う接合の帯電エネルギーの変化が熱エネルギー  $k_B T$  よりも大きくなる場合には、エネ

ルギーを損する電子のトンネルは抑制される。(これはクーロンブロッケイドと呼ばれる。)また、エネルギー的にトンネルが許される場合でも、系のエネルギーを小さくするために、電子は素電荷 $e$ (超伝導接合では $2e$ )を単位として移動するようになる。これらの、電子間のクーロン反発に起因する現象は、単一電子帯電効果と呼ばれ、1990年ころから単一電子デバイスの開発を視野に入れて研究が行われている。

本研究では、単一の素子内で、常伝導体におけるメゾスコピックな位相コヒーレンス、超伝導体におけるマクロスコピックな位相コヒーレンス、単一電子帯電効果のうちの2つ以上が期待される場合に、どのような物理現象があらわれるかを調べることを主たる目的としている。

試料としては、研究題目にあるメゾスコピックなサイズの超伝導体-常伝導体-超伝導体(SNS)2重トンネル接合系

(SETトランジスタ構造)のほかに、後述する理由もあるため、超伝導体-超伝導体-超伝導体(SSS)接合や常伝導体-超伝導体-常伝導体(NSN)接合も用いた。また、電子の波動性の影響を際立たせるために、SETトランジスタの中間電極をリングした試料を主として用いた。

研究経過

研究計画作成段階では、本研究開始時点で、単一電子トンネル効果の精密測定のための工夫を施しやすい希釈冷凍機を使用する予定になっていたが、この装置の導入、調整が1年近く遅れてしまったため、本研究に関するほとんどの測定を以前から所有する汎用の希釈冷凍機で行うこととなった。超伝導体-常伝導体-超伝導体接合系では、電流精度100fA以上で、かつ、最低温度(50mK)部における嚴重なノイズシールド、フィルタリングが必要と考えられたが、汎用の装置で

はこれを達成する事は困難であった。そのため、新型の希釈冷凍機による低ノイズ測定の準備と同時に、ノイズによる影響がそれほど深刻ではない超伝導体-超伝導体-超伝導体や常伝導体-超伝導体-常伝導体接合系についての測定を汎用の希釈冷凍機を用いて行った。研究経過は以下の通りである。

### 1) 接合材料の探索

超伝導体としては、以前から微小トンネル接合の実験に用いているアルミニウムを用いることとし、蒸着条件を変化させることで、超伝導転移温度を調整する事を試みた。また、常伝導金属としては、電子ビーム蒸着をしやすい金、銀、銅についてテストを行い、蒸着後の平均粒径や、不純物の組成、薄膜作製後の安定性を考慮して、銅を用いることとした。

### 2) 低温用ノイズフィルターの開発

単一電子帯電効果の精密測定には、最低温度部において高周波ノイズ除去用の銅パウダーフィルター、低周波ノイズ除去用のRCフィルターが不可欠である。前者の作製のために、銅パウダー内に通す高抵抗ケーブル材料の候補である5種の合金ワイヤーについて、低温での抵抗率、組成、堅さ等の比較を行った。また、RCフィルターについては、最低温度部の省スペースを考慮してチップタイプの素子を用いることとし、各社のチップ型コンデンサーネットワークについて、低温での特性テストを行った。その後、希釈冷凍機の1Kポット部、混合室部に挿入するノイズフィルターを実際に作製し、新しく導入した装置に装着した。

### 3) 微細加工法の開発

従来の金属微小接合作製法である、真空中1軸回転蒸着法では、電子線露光によって作製したパターンが0.2-0.5 $\mu\text{m}$ 程度の間隔において基板上に2回転写されるために、リングなどの複雑

な形状の試料を作製するのが困難であった。そこで、我々は、真空中2軸回転蒸着法を開発し、中間電極にリングのあるSETトランジスタ作製のための電子線露光条件、蒸着条件を探索した。

#### 4) 中間電極にリングのあるSSS、NSN-SETトランジスタの電気伝導の測定

汎用の希釈冷凍機を用いて、中間電極に超伝導リングのあるSSS、NSN-SETトランジスタについて、10mK、2Tまでの磁場下における電気伝導を測定した。特に、我々が以前見出した、SETトランジスタ構造を用いると超伝導リングのフラクソイド量子化が明確に観測できることを利用して、フラクソイド量子化のリングサイズ、輸送電流、超伝導転移温度に対する依存性を調べた。また、超伝導リングのフラクソイド量子化が、単一電子帯電効果に与える影響を調べるために、ゲート電圧によるコンダクタンス変調(クーロン振動)の磁場依存性を調べた。

#### 5) NSN-SETトランジスタの電気伝導の測定

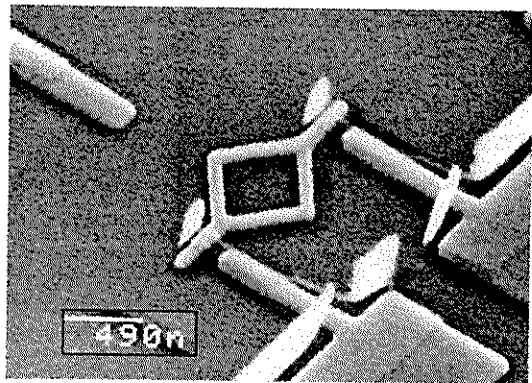
新型の希釈冷凍機導入後、ノイズフィルターなどの測定環境を整備し、NSN-SETトランジスタの電気伝導の測定を50mKにおいて行なった。特に、抵抗値が量子抵抗(25k $\Omega$ )よりもやや大きな試料について、アンドレーエフ反射電流と単一電子帯電効果の影響がどのようにあらわれるかについて詳しく調べた。また、中間電極(常伝導金属)がリングを含む場合について、電気伝導の磁場依存性、ゲート電圧依存性を測定した。

#### 研究成果

##### 1) 試料作製法の確立

真空中2軸回転蒸着法を用いることで右上図に示すようなリング部分に重複のない試料の作製に成功した。

##### 2) 低ノイズ測定の実現



図：真空中2軸回転蒸着法によって作製した、中間電極にリングのあるSNS-SETトランジスタのSEM写真。中間電極以外の電極では、左斜め上向きにパターンが2回転写されているが、中間電極のパターンは1度しか転写されていない。

ノイズフィルターや測定回路の改良、測定プログラムの工夫、および本研究費で購入した電流アンプの使用により、電流のノイズレベルを汎用の希釈冷凍機で1pA、新しく導入した希釈冷凍機で20fAまで低減することに成功した。その結果、SSS-SETトランジスタにおいて、ジョセフソン-準粒子電流の観測、超伝導電流のパリティ効果の観測に成功した。

##### 3) 微小な超伝導リングにおけるフラクソイド量子化の観測

中間電極に超伝導リングのあるSSS、NSN-SETトランジスタ構造において、超伝導エネルギーギャップ $\Delta$ の変化を通してリングのフラクソイド数を決定する方法を見出した。また、リングの微小化によって、低温でも磁束量子が1つずつしか侵入しない試料を作製することができた。さらに、同時にリング内に侵入する磁束量子数は、リング面積、超伝導転移温度の増大とともに増加し、また、ソース-ドレイン電流の増加とともに減少する事を観測した。これらは、単純なモデルで説明することが可能である。

##### 4) 超伝導の位相コヒーレンスが単一電

## 子帯電効果に与える影響

中間電極に超伝導リングのあるSETトランジスタでは、磁場の印加とともにクーロン振動の位相が1方向にシフトすることを見出した。シフト方向は、リングの電位の符号に依存する。このシフトは、中間電極がリングを含まない場合にはみられず、超伝導の位相コヒーレンスと単一電子帯電効果の競合に由来していると期待される。現在、詳細な原因を検討中である。

### 5) SNS-SETトランジスタにおける、アンドレーエフ反射のクーロンブロッケイドの観測

SNS-SETトランジスタの電流電圧特性の電圧 $V=0, \Delta, 2\Delta$ 付近にゲート電圧による周期的な電流変調を観測した。これらは、それぞれ、2重アンドレーエフ反射、アンドレーエフ反射プラス準粒子トンネル、2重準粒子トンネル過程のクーロンブロッケイドに対応している。

#### 今後の課題と発展

以下の1、2)の課題は、今回の研究で計画していたものの、うまく測定できなかったものである。

#### 1) 常伝導電子の干渉性とクーロンブロッケイド

SNS-SETトランジスタにおいて、中間電極内の電子の干渉性がクーロンブロッケイドに与える影響を調べる。

#### 2) 超伝導電子の位相コヒーレンスと、常伝導電子の位相コヒーレンスの関係

トンネル障壁を持たないSNS構造を製作し、その電気伝導のゲート電圧依存性、温度依存性を調べることで、超伝導と常伝導の位相コヒーレンスがどのように結び付くかを調べる。

#### 3) 超伝導リングへの磁束量子侵入のダイナミクスの研究

中間電極が超伝導リングからなるSETトランジスタを用いると、超伝導リング

内への磁束量子トンネル現象のダイナミクスを調べることができる。

#### 4) 電子の波動性と粒子性の競合を用いた能動素子の開発

超伝導体では、クーパー対の数と位相はハイゼンベルグの不確定性関係で結ばれている。したがって、超伝導体を含む素子では、単一電子帯電効果と電子の干渉性の一方で他方を制御することが可能であると考えられる。このことを利用すると、ハイゼンベルグの不確定性関係を動作原理とするデバイスができる可能性がある。

#### 発表論文リスト

A. Kanda, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano: "Single Electron Tunneling Devices ---Single Electron Transistor with a Ring-shaped Island---", proceedings of CRL symposium, "Mesoscopic Josephson Junctions".

A. Kanda, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano: "Magnetoresistance of single-electron transistor with a superconducting loop", Czechoslovak Journal of Physics, 46 S4 (1996), 2297-2298.

A. Kanda, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano: "Transport Properties of Superconducting SET Transistor with a Loop", Physica B227 (1996), 235-237.