

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820150

研究課題名(和文)強磁性体/超伝導体接合におけるアンドレーエフ反射およびスピン緩和に関する研究

研究課題名(英文) Study of Andreev reflection and spin relaxation in ferromagnet/superconductor junction

研究代表者

柏谷 裕美 (Kashiwaya, Hiromi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準部門・主任研究員

研究者番号：60443181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：常伝導体(N)/絶縁体(I)/超伝導体(S)接合の作製を行い冷凍機により冷却して固体冷凍機としての効果を検証した。冷却の効果は接合のコンダクタンススペクトルの理論曲線との比較により行われ、バス温度0.5Kの場合に常伝導体側の温度は0.27Kになっていることが判明し、実際に冷却されていることを確認した。強磁性体/絶縁体/超伝導体接合に関しては、接合特性が得られなかったため、接合のプロセスを見直している段階であり、今後測定を行い、超伝導体/絶縁体/常伝導体接合の特性との比較を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：We fabricate normal-metal/insulator/superconductor tunnel junction for the developments of the solid state refrigerator. The effect of cooling is evaluated by comparing the conductance spectra of the N/I/S junction with theoretical curve. We find that the temperature of the junction is 0.27K when the bath temperature is 0.5K, indicating a successful operation of the present device. In cases of the ferromagnet(F)/I/S junction, since enough junction quality is not obtained so far, we are retuning the process of the junction fabrication.

研究分野：超伝導、磁性

キーワード：トンネル接合

1. 研究開始当初の背景

高感度を得るためにセンサーを低温で使うことがある。例えば、元素分析をする場合に半導体センサを液体窒素で冷却したり、TES (超伝導転移端センサ) を液体ヘリウムを使用して冷却するような場合である。一般的な冷却では、センサーのみでなくセンサー付近のステージなども冷却が必要で、しかも 1K 以下の低温になると、装置も大がかりになり、冷却にはコストも時間もかかるのが現状である。何とかして、センサー付近のみ冷却することができないだろうかという問題を解決できる一つの候補が固体冷凍機である。

物質はその温度に応じた準粒子分布を持っており、例えば金属では $T=0K$ において、フェルミエネルギー (E_F) 以下に電子が詰まっている。基本的に、平衡状態で温度が決まると準粒子分布が決まるが、逆に準粒子の分布を制御することにより冷却を実現することも可能である。このようなアイデアをもとに、超伝導トンネル接合を固体冷凍機として使用する研究が近年進められている。

一例として、S/I/N/I/S 接合を挙げる。図 1 は S/I/N/I/S 接合のエネルギーダイアグラムであるが[1]、超伝導ギャップには準粒子は流れないため、接合間に電圧をかけることにより N 中に存在する熱い準粒子を選択的に S 側の状態密度の空席に移すことができると、N の電子温度は冷却される。

固体冷凍機を利用し、冷却が必要なセンサー部分のみを局所的に冷却できれば、効率のよい冷却が可能となる。

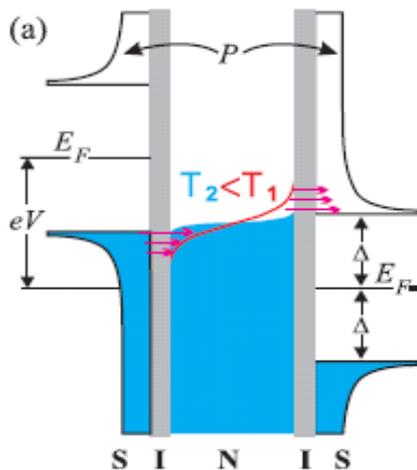


図 1 S/I/N/I/S 接合のエネルギーダイアグラム[1]

2. 研究の目的

現状では、これまでに作製された N/I/S 型

の固体冷凍機では、冷却能力が不十分である。その理由としては主に二つあり、第一に、アンデレーフ反射 (Andreev reflection) によるギャップ内に流れてしまう電流が存在することである。アンデレーフ反射は常伝導体と超伝導体の界面で現れる反射プロセスであり、電子が界面に到達した場合は、ホール反射とともに、界面から超伝導体にクーパー対として入射する。接合抵抗が低い場合やピンホールなどが存在する場合に、効果が大きくなることが予想される。固体冷凍機は電流が熱を運ぶことになるため、絶縁体の抵抗を減らすことにより電流密度を増加させ、冷却能力を増加させることが可能である一方で、絶縁層の厚みを減らすことにより、アンデレーフ反射が起こり超伝導ギャップ内の電流が増加し、冷却能力が弱められてしまう結果となる。

第二に、排熱が不十分であることが挙げられる。超伝導中に取り出した準粒子の緩和が早く生じ、その過程で超伝導体側に取り出した熱が常伝導体側に還流してしまうという問題である。

これらの問題に対し、本研究では、高い偏極率を持つ強磁性体を極めて薄い絶縁層を有する強磁性体/絶縁体/超伝導体接合を作製することにより、アンデレーフ反射が実際に抑制されるか検証し、絶縁体抵抗を低減させるための指針を完成させることを目的とする。

3. 研究の方法

アンデレーフ反射の比較を行うために、従来型の超伝導体/絶縁体/常伝導体の接合の作製から始めた。本研究にとって、接合の界面の品質がアンデレーフ反射を左右するために重要であり、様々な作製プロセスを通す前の段階で界面を作製する手法を採用した。超伝導層には AlMn を採用し、この表面をチャンバーから出さずに酸化させ、高品質な絶縁膜が得られる。その後フォトリソグラフィなどを行い希望する形状への加工を行った。

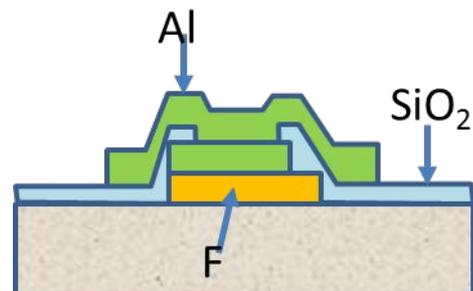
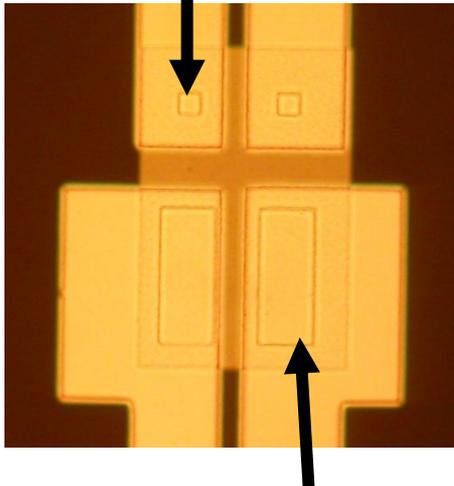


図 2 強磁性体/絶縁体/超伝導体接合の断面図

また、常伝導体部分を強磁性体に変更した、強磁性体/絶縁体/超伝導体接合の作製を行った。図2に、接合の断面の模式図を示す。図中のAlは超伝導体、SiO₂は絶縁体、Fはホイスラー合金を使用した。ホイスラー合金に関しては、スピン偏極率の高い物質であり、作製の条件の最適化にはノウハウが必要であるため、日本大学理工学部 松田健一准教授の提供を受けて作製を行った。

温度測定用接合



固体冷凍機用接合

図3 作製した強磁性体/絶縁体/超伝導体接合

図3に、実際に作製した接合の顕微鏡写真を示す。面積の大きいものが冷凍機用の接合、面積の小さいものが温度モニター用の接合としてデザインされた。本来は、二種類の絶縁膜の厚みを変えることにより動作させる予定であったが、それぞれの厚みのコントロールが現状では困難であったため、温度モニター用の接合は使用しないこととした。

4. 研究成果

作製した接合は、3He 冷凍機に配置され、冷却しながら特性が測定された。低温に冷やした状態で超伝導体/絶縁体/常伝導体トンネル接合のコンダクタンススペクトルを測定した結果を図4に示す。

S/I/N/I/S 接合のモデルとして、同じ常伝導抵抗 R_{NN} をもつ二つの等価な N/I/S 接合が、常伝導の部分を通じて直列につながっているものを考えた。BCS 表式による曲線と測定によるコンダクタンス曲線のずれは、接合が固体冷凍機として動作していることによるものである。

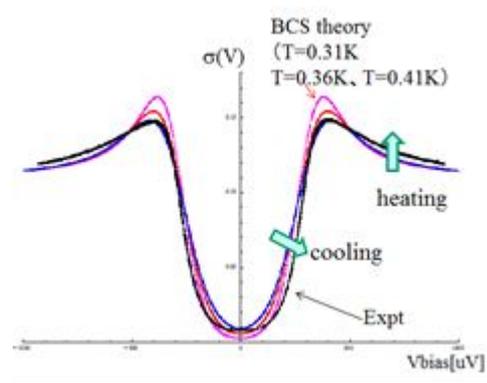


図4 超伝導体/絶縁体/常伝導体トンネル接合の測定結果および計算結果との比較

また、実験データと理論値によるフィッティングから、バス温度 $T=0.5K$ の時に $0.27K$ まで冷却されていることが確認できた。

強磁性体/絶縁体/超伝導体接合に関しては、測定を行った結果接合特性が得られなかったため、接合のプロセスを見直している段階であり、今後測定を行い、超伝導体/絶縁体/常伝導体接合の特性との比較を行う予定である。

[参考文献]

[1] J.T. Muhonen, et al, Rep. Prog. Phys. 75, 1 (2012)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, and Y. Tanaka
Development of suspended normal-metal-type tunneling junction refrigerator, Japanese Journal of Applied Physics, 55, 2016, 093101、査読有

[学会発表](計 3 件)

“NIS トンネル接合型固体冷凍機素子プロセスの開発”, 柏谷 裕美、柏谷 聡、川畑 史郎、小柳 正男、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学、京都市、2013.9

“Development and analysis of NIS refrigerator”, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, The 3rd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD), 産総研、つくば市 2016.11

NIS トンネル接合型固体冷凍素子開発 IV, 柏谷 聡、柏谷 裕美、小柳 正男、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、名古屋市、2015.9

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏谷 裕美 (Hiromi Kashiwaya)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
分析計測標準部門 主任研究員
研究者番号：60443181

(4) 研究協力者

小柳 正男 (Masao Koyanagi)
柏谷 聡 (Satoshi Kashiwaya)
松田 健一 (Kenichi Matsuda)