

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286046

研究課題名(和文) 強磁性体効果を用いたトンネル接合型冷凍機の実現

研究課題名(英文) Development of tunneling junction refrigerator with ferromagnetic effect

研究代表者

柏谷 聡 (Kashiwaya, Satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・首席研究員

研究者番号：40356770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：トンネル接合型固体冷凍器は、極低温センサーの冷却効率を劇的に改善する技術として注目されている。ここではSuspend型の固体冷凍器を開発を行い、極めて高効率な冷却(0.334Kのベース温度で0.0093K)がなされていることを確認した。コンダクタンスと熱輸送を連立して解くことにより、電子温度と超伝導ギャップを正確に求める手法を開発し、さらに非平衡超伝導理論を適用することにより、現在の冷凍能力のリミットが準粒子によるペア破壊であることを明らかにした。これは強磁性トンネル等を用いた接合部の改良による準粒子注入の高効率化では冷凍能は向上せず、廃熱部等の能力改善等を行う必要があることを示している。

研究成果の概要(英文)：We develop a superconducting-normal metal-superconductor tunneling junction refrigerator of a suspended normal-metal type for cooling of high sensitive sensors working at ultralow temperature. The performance of the refrigerator is evaluated by comparing experimental conductance with numerical results of a theoretical formulation. The lowest temperature of 0.093 K at a bath temperature of 0.334 K indicates the successful operation of the refrigeration. The maximum cooling power of the present refrigerator estimated based on the non-equilibrium stationary state model is 213 pW at the junction area of  $40 \times 7 \text{ m}^2$ .

研究分野：低温物性

キーワード：固体冷凍器 トンネル接合

### 1. 研究開始当初の背景

低温環境が必須である超伝導センシング応用にとって、小型、安定、簡便な冷凍機を開発することは長年の課題であった。トンネル接合型固体冷凍機は、超伝導センサの冷却コストを劇的に軽減させる可能性を強く秘めた技術である。接合型冷凍機の原理は、図1のような常伝導体/絶縁体/超伝導体(N/I/S)接合において、NとSの間にSの超伝導ギャップよりわずかに小さいバイアス電圧(V)を印加した系において説明される。この条件下ではSのエネルギーギャップのためギャップ内には電流は流れず、N中の高エネルギーの準粒子をS側に選択的に引き出すことができ、N中の電子温度が下がり、電子冷却機能が実現される。現在までに開発されたN/I/S型冷凍機の冷凍能力はまだ不十分であり、本格的な実用にはほど遠い。接合型冷凍機の冷却機能向上を阻害している主要な原因は主に2つある。(1)本冷凍機の冷却機能は電流が熱を運ぶことであり、接合抵抗の低減は電流量を増加させ、冷却能力を増加させるはずである。しかし実際には、絶縁層の厚みを減らせば2電子トンネル過程であるアンドレーエフ反射確率が増大し、低エネルギー成分のギャップ内電流が増え、冷却能力は逆に弱められる。(2)S中に取り出した準粒子がすぐに緩和してしまい、その過程でせっかくS側に取り出した熱がN側に還流してしまう(排熱の還流)。

### 2. 研究の目的

本研究では、冷凍能力向上を阻害する主要因である、「ギャップ内電流」と「排熱の還流」を抜本的に解決するアイデアとして、**強磁性体効果**に着眼する。従来型冷凍機の常伝導電極を強磁性体に置き換えた、強磁性体/絶縁体/超伝導体(F/I/S)接合型冷凍素子を開発し、強磁性体によるアンドレーエフ反射の抑制と、高いスピン偏極率に起因する準粒子緩和長の増大による排熱の効率化を実現する技術を確認する。これに基づき、冷凍能力を飛躍的に向上させた固体冷凍機を開発するとともに、エネルギー、電荷、スピンに関する多重非平衡超伝導の物理を開拓する。固体冷凍器としては世界最高能レベルの0.3Kベース温度で0.1Kの動作を行うことを目標とする。

### 3. 研究の方法

研究は従来型のN/I/S接合を用いて進められた。これはF/I/Sの3層膜作成が装置状況により予定とおり進まなかったことと、N/I/S接合を用いても、トンネル抵抗の低減化により十分な性能改善が行えるという見積もりに基づいていた。N層としてはAlMn<sub>x</sub>(X=0.8wt%)を用い、AlMn<sub>x</sub>表面を参加させることにより高品質な絶縁体を形成し、これによりトンネル特性の高度な制御を用いる方針で進めた。そのプロセスを図1に示す。

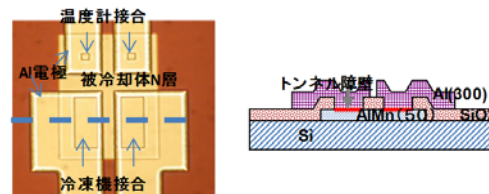


図1 従来型固体冷凍器作成と構造断面図

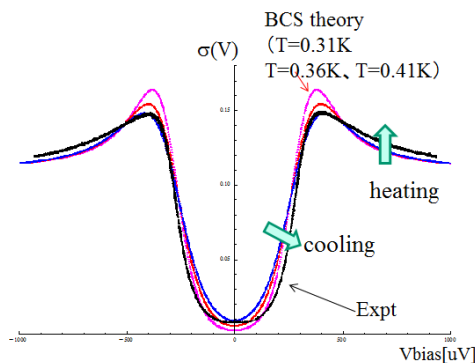


図2 従来型冷凍器のコンダクタンス特性と理論との比較

また、この手法により得られた固体冷凍器のトンネル特性を図2に示す。

図2に示すコンダクタンス特性は、バイアスに依存して冷却と加熱が起こっており、ギャップ内ではベース温度0.33Kに対して0.31K程度の冷却が実現している様子を示している。実際に冷却機能の実現には成功しているが、この方式による冷却は、電極を取るためにビア構造の作成が必要であり、その結果バリア特性の改善に限界があり、十分な冷却能力を得ることが極めて難しいことがプロセス条件だしとともに明らかとなった。

その欠点を克服するために、素子構造を抜本的に改造し、N層をトップレイヤーとして有するsuspend型NIS接合に着手した。この場合のN層はCuを用い、加工プロセスに対する保護層としてAlMnを用いている。図3には作成プロセスを示したが、この構造ではビア構造が不要であり、プロセスが大幅に簡易化されており、さらにAl酸化膜の品質は加工プロセスに依存せず、薄膜プロセスのみに依存するため、より高度なバリア層の制御が可能である。

一方、輸送特性からより正確に冷凍能力の評価を行うために、コンダクタンス表式と熱輸送方程式を連立させて解くことにより、電子温度を正確に評価する方程式を導いた。これにより実験から得られたコンダクタンス曲線からより正確に電子温度、冷凍能力の評価を行うことが可能になった。作成された表式からsuspend型NIS接合の冷凍能力を評価

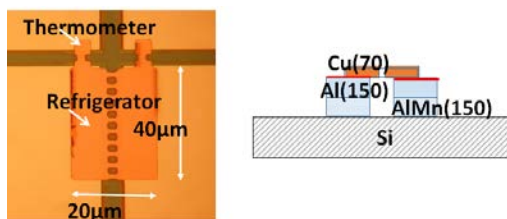


図 3、suspend 型固体冷凍器と構造断面図

したところ、0.334K のベース温度にて動作させた冷凍器の到達温度は 0.093K となっており、目標値としていた 0.1K を超えて、きわめて有効に冷凍器が動作していることが評価できた。また動作温度を変化させた場合のギャップ値の変化より、非平衡超伝導体の  $\mu^*$  モデルと良い一致が見られ、これ以上接合コンダクタンスを向上させても超伝導ペア破壊が起こることにより、冷凍能力の向上は得られないことが明らかになった。よって今後更なる特性向上のためには、準粒子緩和による廃熱の改善が必要であることが明らかとなった。

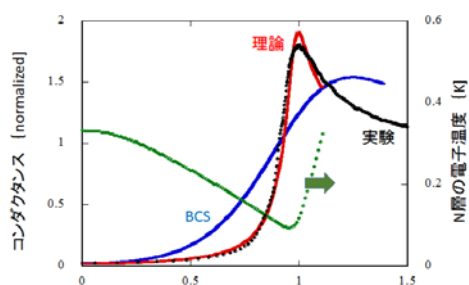


図 4 Suspend 型固体冷凍器のコンダクタンス特性 (黒)、理論特性 (赤)、ベース温度の BCS 特性 (青) および N 層の電子温度のバイアス依存性 (緑)

#### 4. 研究成果

Suspend 型の固体冷凍器を開発し、0.334K のベース温度で 0.0093K まで冷却が起きていることを確認した。これは超伝導等のセンサー応用にきわめて重要な技術であると考えられる。また非平衡超伝導理論を適用することにより、現在の冷凍能力のリミットが準粒子によるペア破壊であることを明らかにした。これは強磁性トンネル等を用いた接合部の改良による準粒子注入の高効率化では冷凍能は向上せず、廃熱部等の能力改善等を行う必要があることを示している。よって現在奇周波電子対を利用した新しい廃熱構造の改善を計画している。また実際のセンサーを組み込み動作させる検討を開始している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Kawabata, A. Ozaeta, A. S. Vasenko, F. W. J. Hekking and F. S. Bergeret “Efficient electron refrigeration using superconducting/spin-filter devices” Appl. Phys. Lett. 103, 032602-1-3, 2013
- ② S. Vasenko, S. Kawabata, A. Ozaeta, A. A. Golubov, V. S. Atolyanov. F. S. Bergeret. And F. W. Hekking, “Detection of small exchange field in S/F structure”, J. of Magnetism and Magnetic materials. 383, 175-177 (2015)
- ③ S. Kawabata, A. S. Vasenko A. Ozeata, F. S. Bergeret and F. W. J. Hekking, “Heat transport and electron cooling in ballistic normal-metal/spin-filter/superconductor junction”. J. of Magnetism and Magnetic materials. 383, 157-161 (2015).
- ④ S. Kashiwaya, H. Kashiwaya. M. Koyanagi “Development of suspended normal metal type NIS refrigerator” Jpn. J. Appl. Phys. 印刷中

[学会発表] (計 9 件)

- ① 柏谷裕美、柏谷聡、川畑史郎、小柳正男、“NIS トンネル接合型固体冷凍器の開発”、応用物理学会、2014 年 9 月 18 日
- ② 柏谷裕美、柏谷聡、川畑史郎、小柳正男、“NIS トンネル接合型固体冷凍器”、応用物理学会、2013 年 3 月 19 日
- ③ 川畑史郎、A. A. Golubov. “ノンコリニア磁気構造を持つスピンフィルタージョセフソン接合における量子輸送理論、日本物理学会、2015 年 3 月 21 日
- ④ 柏谷聡、柏谷裕美、小柳正男、トンネル接合型固体冷凍器の開発 III”、応用物理学会、2015 年 3 月 21 日
- ⑤ 塚田雄太、胡桃聡、松田健一、鈴木薫、「レーザ支援気固界面熱分解法による P ドープ CNT の特性測定」2015 年放電学会年次大会 2015/12
- ⑥ 渡邊学、大野貴史、胡桃聡、松田健一、鈴木薫、「レーザアニールによるダイヤモンド状炭素の電気、光学的特性改善」平成 28 年 電気学会全国大会 2016/03
- ⑦ R. Ishihara, T. Sagara, S. Kurumi, K. Matsuda, and K. Suzuki“Synthesis of Rod-Shaped Iron Nanocrystals Using Blue Laser-Assisted Pulsed-Laser Ablation in Liquid”The 13th

International Conference on Laser Ablation 2015/09

( )

- ⑧ K. i. Matsuda, Y. Suda, S. Matsuo, N. Hatakenaka, S. Kurumi, and K. Suzuki "The effect of deformation on the transport properties of quantum nanowires" 2015 Material Research Society(MRS) Fall meeting. 2015/11

研究者番号 :

- ⑨ 柏谷聡、柏谷裕美、小柳正男、トンネル接合型固体冷凍器の開発 IV", 応用物理学会、2015年9月16日

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<https://staff.aist.go.jp/s.kashiwaya/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏谷聡 (Kashiwaya Satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術部門・首席研究員、

研究者番号 : 40356770

(2) 研究分担者

松田健一 (Matsuda Kenichi)

日本大学・理工学部・准教授、

研究者番号 : 80360931

2014年まで

川畑史郎 (Kawabata Shiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術部門・主任研究員、

研究者番号 : 30356852

(3) 連携研究者