

スピン吸収効果を用いた極微細スピントーリングデバイスの開発

研究代表者

木村 崇 九州大学理学研究院物理学科

共同研究者

原 正大 熊本大学大学院自然科学研究科



1. 研究の背景と達成目標

今日の電子デバイスの高密度化・高性能化の進歩は著しいが、同時に、デバイス内部の消費電力増大による発熱量の増大が深刻な問題となっている。一方で、近年、電子の流れが創り出す新しい物理量『スピン流』の概念が確立されると共に、熱とスピン流の相互作用が注目されつつある。そこで、本研究では、スピン流を用いた新奇な冷却技術を開発する。具体的には、純スピン流を用いてナノ磁性体中のスピンや磁化を制御することで、磁気熱量効果やスピン依存ペルチェ効果などを効率的に引き出し、選択的な冷却効果を発現させる技術を開発する。純スピン流とは、電気の流れを含まないスピンのみ流れであり、電気抵抗が高い物質中にも効率的にスピンを注入されることができる。このため、従来の熱電デバイスにおいて問題視されていたジュール熱の影響などを大幅に低減され、半導体集積回路などの固体電子デバイスに積載可能な極微細磁気冷凍素子の開発が期待できる。

本プロジェクトでは、本研究では、ナノサイズの磁気熱量材料中のスピントロピーを、純スピン流注入により、低消費電力かつ選択的に制御して冷却効果を発現させる技術を開発するべく、①高品質なナノ構造磁気熱量材料の作製技術を確立し、次に②高効率な純スピン流生成技術を開発し、そして③スピントーリングデバイスの試作を行った。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- Gd 薄膜の微細加工技術を確立すると共に、二次元電子ガスを用いたバリストック磁界センサーを作製することで、サブミクロンサイズの単一磁性細線の磁化過程を検出した。磁気熱量効果はこれまでバルク系でのみ研究されており、局所的な磁化状態を検出するのは困難であった。本手法は、磁気熱量効果を微視的に調べる上で、極めて有効な手段となりうる。
- アモルファス構造を持つ CoFeAl 合金を用いることで、極めて高効率に電氣的純スピン流の生成が可能であることが分かった。本手法は、特別な基板の準備やエピタキシャル成長などを行う必要が無く、蒸着やスパッタなどで作製可能であるため、極めて汎用性が高く、量産プロセスにも適用可能である。
- Gd 細線によるスピン吸収効果を観測し、純スピン流注入による磁気冷凍効果の観測に成功し、冷却効果を確認した。本技術は、現時点、実用化に耐えうる冷却能力が実現されていないが、スピン注入による磁気冷凍効果が確認されたこと、更に、選択的な冷却が可能であることを示した点が魅力的である。
- アモルファス構造を持つ CoFeAl 合金が比較的大きなスピン依存ペルチェ係数を持つことを見出し、更に、同効果を用いてスピン流注入による冷却効果を確認した。スピン依存ペルチェ効果は、報告例が少なく、また、その効果も極めて小さかったが、CoFe 系では、特有のバンド構造から、これまで報告があった他の物質に比べ、10倍以上の大きさを持つことが判明した。今後の更なる物質設計の最適化により、より一層の冷却効果増大が期待できる。

3. 研究成果

まず、磁化特性や磁気伝導特性が微細化しても劣化しない Gd ナノ構造の作製法を確立し、更に、図1に示すように微細な Gd 細線の高感度測定を実証した。通常の 3d 金属磁性体と同様、形状磁気異方性を付加できることが分かった。一方で、磁気抵抗においては、磁化反転に対応する抵抗変化が観測できず、本手法は Gd ナノ構造の磁化過程を高感度に磁化を測定できる極めて有力な手法であることを見出した。

次に、スピン生成源をこれまで主流であった NiFe から CoFeAl に変化させることで、図2に示すように、スピン流生成効率の飛躍的向上(5倍以上の向上)を実現した。スピン吸収に関しては、Gd の厚さを増大させることで、吸収効率が向上する傾向が確認されたが、磁化方向には明瞭な依存性を確認できなかった。

更に、中間 Gd 細線を挿入したスピン信号の評価実験を行い、Gd 細線へのスピン吸収効果を確認した。その後、非局所端子の電圧がゼーバック電圧に比例、すなわち電圧端子近傍の温度に比例することを利用して、系の温度変化を見積もった。図3に示すように、Gd 細線を挿入した素子では、スピン注入強度の増大とともに、著しいベース電圧の低下が観測された。このことは、系の温度が低下していると考えられ、スピנקーリング効果を実現されたと言える。

更に、当初は想定していなかったが、CoFeAl において、極めて効率的に熱流 → スピン流変換が成されることが判明したため、その逆変換である純スピン流 → 熱流変換を通して、冷却効果の実現を目指した。その結果、温度変化に起因した信号の変化を観測することに成功した。

4. 今後の展開

上記のように、スピン流を用いた二種類の現象から、スピנקーリング効果を実現することに成功した。しかしながら、現時点においては、どちらの現象も、その冷却性能は十分ではない。磁気熱量効果に関しては、今回取り扱った Gd において、磁化を担う f 電子とスピン流である伝導電子の相互作用が小さいことに起因していると考えられる。CoFeAl に関しては、今回、実証した手法では、精度よく測定するために、加熱 → スピン流 → 冷却にと、少し複雑で非効率的な手法を用いている。実際の発熱源を冷却するという観点では、より適切な手法がと考えられ、いち早い実証を目指したいと考えている。

5. 発表実績

- Original paper : S. Hu, and T. Kimura, Phys. Rev. B 90, 134412 (2014)
- Original paper S. Hu, H. Itoh and T. Kimura, NPG Asia Mater., 6, e127 (2014)
- Original paper X. Cui, S. Hu and T. Kimura, Appl. Phys. Lett. 105, 082403 (2014).
- Original paper Y. Kanda, T. Nomura, T. Kimura, and M. Hara, , Appl. Phys. Lett. 104, 142408 (2014).
- Original paper S. Hu and T. Kimura, Phys. Rev. B 87, 014424 (2013).
- Original paper C. Mu, S. Hu, J. Wang and T. Kimura, Appl. Phys. Lett. 103, 132408 (2013).
- Original paper: S. R. Bakaul, S. Hu, and T. Kimura, Phys. Rev. B 88, 184407

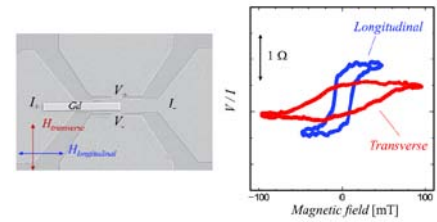


図 1. 微細 Gd 細線の磁化曲線

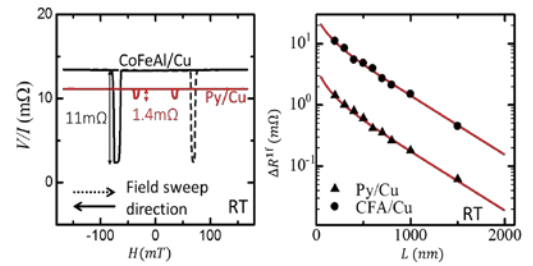


図 2. CoFeAl 電極による純スピン流生成効率増大

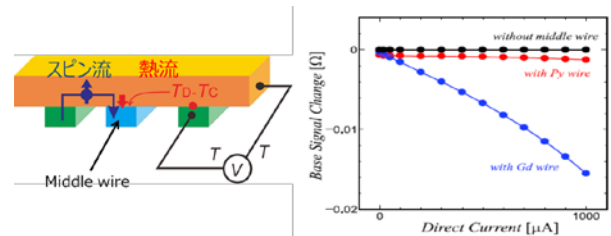


図 3. スピנקーリング効果によるベース信号の低下