

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048026

研究課題名（和文） スピン流高周波・熱デバイスの研究

研究課題名（英文） Research on Spin current driven high frequency and heat devices

研究代表者

鈴木 義茂 (SUZUKI YOSHISHIGE)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：50344437

研究分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料 応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：スピン流・磁性体ナノ構造・高周波特性・熱輸送・スピントロニクス

1. 研究計画の概要

2003 年に強磁性多層膜への電流注入により自励発振が(S. I. Kiselev, *et al.*: Nature 425(2003)380)観測されて以来、強磁性ナノ構造のスピンダイナミクスが興味を集めている。提案者等は、MgO バリヤを用いた高性能トンネル磁気抵抗素子を開発し(Nature Materials, 3 (2004)868)、この素子を用いてスピンダイナミクスの高度な制御(Nature, 438(2005)339)、および、これまでの 10000 倍近い高周波発振出力の実現(ICMFS 2006, Sendai にて発表)に成功した。しかし、これまでの研究は 15GHz 以下の周波数に限られていた。一方、反強磁性体ではそのスピン波の周波数が遠赤外域に達することが知られている。そこで、本研究では、反強磁性結合多層膜や反強磁性体などのスピン波とスピン流との結合機構を解明し、スピン流の超高速ダイナミクスの学理を確立するとともに、スピン流ミリ波・THz 波デバイスの可能性を明らかにすることを第一の目的とする。

さらに、提案者等は強磁性多層膜からできたナノピラーに電流を流すと冷却作用が生じることを見出した(Jpn. J. of Appl. Phys., 44 (2005)L12-L14)。しかし、スピン流の熱力学はまったく未踏の研究領域である。そこで、この現象へのスピン自由度およびスピン流の寄与を明らかにし、さらに、スピン流に

よる熱の輸送・吸収、熱によるスピン流の発生などスピン流に関する非平衡熱力学の確立につながる知見を得ることを第二の目的とする。

2. 研究の進捗状況

強磁性体中を流れるスピン流は、局在磁化の反転や歳差運動、さらには一様な強磁性状態の不安定化などを引き起こす。反強磁性構造に電流を印加した場合、電流によりその磁気構造の不安定化や、高い反強磁性共鳴周波数に起因する高周波発振現象が期待される。本研究では、反強磁性結合膜に直流電流を印加し周波数領域の測定を行うことで、スピントルクにより誘起される磁化の自励発振現象を観測し、その外部磁場依存性について調べた。また、実験結果とマクロスピンモデルによる計算との比較を行った。

試料は分子線エピタキシー装置により作製した Fe/Cr/Fe 薄膜を、電子線リソグラフィとイオンミリングを用いて $0.1 \times 0.15 \text{mm}^2$ サイズの GMR(巨大磁気抵抗効果接合膜)ピラー構造に加工したものである。スペクトラムアナライザとロックインアンプによる変調法を用いて高周波出力スペクトルの高感度測定を行った。その結果、反平行磁化配置でスピントルク発振が誘起され、一方、スピンフリップが生じた後の中間状態では磁化のスイッチングが観測された。また、マクロスピンモデルを用いて計算した素子抵抗の磁

場および電流依存性から反平行磁化配置において磁化の自励発振に起因する抵抗の低下が観測されている。これらの計算から得られた発振周波数の磁場依存性より、反平行磁化配置における低磁場では主に光学モードが誘起され、一方で反平行磁化配置の高磁場領域では音響モードが主な歳差運動の励起モードであることがわかった。即ち、低磁場領域において交換結合を用いて高い周波数の発振を実現できることが分かった。

一方、産総研では強磁性多層膜から出来たナノピラーに電流を流すと冷却作用が生じることを見出した。しかし、この現象へのスピン自由度およびスピン流の寄与は明らかになっていない。そこで、本研究では、まず、温度勾配がある場合のスピン流の発生と熱の伝搬についてボルツマン方程式の取扱いに基づく理論を構築した。その結果、強磁性体中の熱勾配によりスピン流が発生すること、さらに、非平衡なスピン波により大きなゼーベック効果が期待できることが見出された。ついで、実際にトンネル磁気抵抗素子を作製し熱勾配を加えたところ磁化状態に依存する電圧の発生がみられた。現在その原因を解明中である。

3. 現在までの達成度

おおむね順調に進展している。

(理由)

交換結合を用いたより高い周波数の発振については実証できた。達成度は 85%である。一方、スピンに関する熱効果については理論の構築とその理論に基づいた現象の予想が終わり、実験的にも初期的なデータが出始めた。達成度は 70%である。

4. 今後の研究の推進方策

高周波の発振についてはさらに強い交換結合を持つ系の励起について、強磁性共鳴・ブリルアン光散乱・光ポンプ法による実時間観察を通してより詳細な研究を行う。熱効果については実験結果を定量化して理論との比較を行う。

5. 代表的な研究成果

(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) Takeshi Seki, Hiroyuki Tomita, Masashi Shiraishi, Teruya Shinjo, and Yoshishige Suzuki, "Coupled-Mode Excitations Induced in an Antiferromagnetically

Coupled Multilayer by Spin-Transfer Torque", Appl. Phys. Express 3, 033001 (2010). 査読有

2) D. Hatanaka, S. Tanabe, H. Kusai, R. Nouchi, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki and M. Shiraishi, "Enhanced magnetoresistance due to charging effects in a molecular nano-composite spin device", Phys. Rev. B 79, 235402 (2009). 査読有

3) A. A. Tulapurkar and Y. Suzuki, "Contribution of electron-magnon scattering to spin-dependent Seebeck effect in a ferromagnet", Solid State Comm., doi:10.1016 (online available) 査読有

4) T. Seki, H. Tomita, A. A. Tulapurkar, M. Shiraishi, T. Shinjo, and Y. Suzuki, "Spin-transfer-torque-induced ferromagnetic resonance for Fe/Cr/Fe layers with an antiferromagnetic coupling field", Appl. Phys. Lett. 94, 212505-1-3 (2009) 査読有

[学会発表](計4件)

1) T. SEKI, SSDM2009・2009/10/9・仙台国際ホテル

Spin-Transfer-Torque-Induced RF Oscillation for Fe/Cr/Fe Layers with an Antiferromagnetic Coupling Field

2) 升方康智, 日本金属学会・2009/09/16・京都大学

AuCu合金をbuffer層に用いたCo/Cu/Co反平行結合膜の磁気特性

3) 関剛斎, 第33回日本磁気学会学術講演会・2009/09/13・長崎大学

反平行結合 Fe/Cr/Fe 膜におけるスピントルク発振

4) 関剛斎, 2009年春季第56回応用物理学関連連合講演会・2009/4/2・筑波大学

反平行結合膜におけるスピン流と強磁性共鳴モードの結合

[図書](計1件)

1) Yoshishige Suzuki, Ashwin A. Tulapurkar, and Claude Chappert, "Spin-Injection Phenomena and Applications" in "Nanomagnetism and Spintronics", Teruya Shinjo Edited, Elsevier Science & Technology, Chapter, pp.94-155 (2009).