

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740219

研究課題名（和文） ブロードバンド強磁性共鳴法によるスピンプンピング効果の研究

研究課題名（英文）

Study of the spin pumping effect by broadband rectification

研究代表者

山口 明啓 (YAMAGUCHI AKINOBU)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号：70423035

研究成果の概要：微小人工磁性体に任意の方向で高周波磁場・電場を印加し、強磁性共鳴状態を引き起こし、整流効果を用いて強磁性共鳴を検出することに成功した。磁性体の境界条件を反映したスピン波モードに対応した直流電圧スペクトルを解析することで磁化の動的挙動ならびにスピン電流発生機構を理解することができた。スピンプンピング効果ならびに単一ナノ磁性体を研究するためのブロードバンド強磁性共鳴検出の手段を確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,100,000	0	3,100,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	120,000	3,620,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：磁気共鳴，スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

社会を支えているエレクトロニクスは電子のもつ電荷を利用している。特に半導体を用いたエレクトロニクス素子は高密度化され、機能は充実してきたが、高密度化による発熱の影響や微細化による電荷制御・量子限界などの問題が生じてきた。一方、電子には電荷の他にスピンという自由度があり、スピンを積極的に制御することによって従来の半導体素子では解決できなかった点や新しい機能性を実現する試みが成されるようになってきた。加えて、スピンの加わることによって、新しい物理現象の発現が期待されている。このような研究分野はスピントロニクスとされ、全世界的に大きな研究分野と成長し

てきた。特に巨大磁気抵抗効果は、スピン依存散乱やスピンの量子閉じ込め効果など新しい発見がなされ、ノーベル物理学賞受賞やハードディスクの読み取りヘッド応用による記録密度向上など基礎物理と応用研究ならびに社会への還元という点で非常に価値がある研究となっている。

最近、強磁性/非磁性/強磁性という3層構造を有する人工ナノ磁性体において、電流によって磁化反転を制御できる提案ならびに実証実験がなされた。その結果、不揮発性磁気メモリとしての応用として非常に注目された。同時にどうして電流によって磁化が制御できるのか、他の物理現象を伴っていないか？など基礎的な物理機構についても注

目を集めることになった。

2. 研究の目的

強磁性金属から別の接合物質に電流を流すことによって、スピンの物質に注入される。このことを一般的にスピン注入という。スピン注入によって磁化反転が起きることが報告され、その逆現象の確認が急がれていた。

本研究は、磁化の歳差運動によってスピン流がどのように生成されるのかを明らかにするために、特に磁化を自在に歳差運動させて、それを検出する手段がないと研究が始まらないので、第一に局所磁化励振と検出手法の確立を行う。次に検出は電気的に行うので、電流を入力するとスピン注入による寄与や局所励振磁場による効果が重畳してくる。それらが、どのように検出されて、それぞれの効果を分離し、磁化の歳差運動から励起される成分をどのように取り出すのかについても考察する。

3. 研究の方法

ナノ磁性体に局所的に高周波磁場を印加して、磁化の歳差運動を励起し、電気的に検出する手法を確立する。絶縁性の良い MgO 基板の上にコプレーナガイドを形成し、その上あるいはコプレーナガイドの間に磁化歳差運動を励起・測定したい試料を作製する。この作製には、電子線リソグラフィ・超高真空蒸着ならびにリフトオフというプロセスを用いた。このように作製した試料に電極をつけ、高周波電磁波を周波数掃引して入力すると磁性体が強磁性共鳴を起し、磁気抵抗が時間的に振動する。このとき、入力している高周波電磁波によって試料に電流が同時に生じており、高周波電流と磁気抵抗の周波数が一致したときに直流電圧が発生することが期待される。

得られたスペクトルを解析することによって磁化の動的挙動を検出することで、歳差運動からどのようにスピン流が生成されるかを明らかにする。

4. 研究成果

図 1 に、MgO 基板上に電子線リソグラフィとリフトオフ法を用いて作製した $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 直線形状細線とコプレーナガイド電極ならびに測定回路の概念図を示す。図 1(a) は細線面内に高周波磁場を印加するために、コプレーナガイドの上に $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 細線を配置した試料の模式図と実際の試料光学顕微鏡像である。図 1(b) は細線面直に高周波磁場を印加するために、コプレーナガイドの信号線とグランド線の間に細線試料を配置した試料の模式図と試料光学顕微鏡像である。これらの配置によって、図 2 に示すように高周波

磁場が試料に印加されることが高周波電磁波解析シミュレーターで確認した。

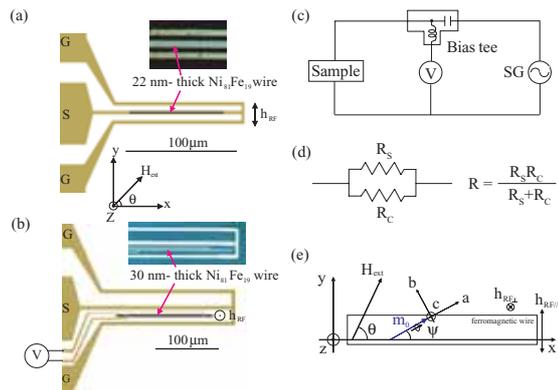


図 1 MgO 基板上に作製した試料細線と電極の光学顕微鏡写真ならびに測定回路の概念図。

面内・面直磁場は高周波信号で発生させるが、このとき細線試料にも電流が流れるため、整流効果が発生するので、細線内部の磁気モーメントの挙動が解析できる。面内磁場励起と面直磁場励起それぞれの場合について、実験を行った結果を図 3 ならびに図 4 に示す。

発生した直流電圧信号 ΔV_0 の外部磁場角度依存性は面内・面直磁場励起の場合は、簡単なモデルから以下のようなになる[4, 5]。

(i) 面内磁場励起

$$V_0(\omega) \propto \sin 2\theta \cos \theta \quad (|H_{\text{ext}}| \gg |H_A|)$$

$$V_0(\omega) \propto H_{\text{ext}} \sin \theta \quad (|H_{\text{ext}}| \ll |H_A|)$$

(ii) 面直磁場励起

$$V_0(\omega) = -B(\omega) \cdot \frac{I_S \cdot I_C \cdot \Delta R \cdot \omega^2 \cdot \alpha \cdot \Delta}{2y} \cdot \sin 2\theta$$

$$(|H_{\text{ext}}| \gg |H_A|)$$

面内ならびに面直磁場励起による直流電圧信号 ΔV_0 の外部磁場角度依存性の測定結果を図 5 ならびに図 6 にそれぞれ示す。それぞれの結果は、モデルとよく一致しており、細線内部の磁気モーメントの動的挙動がランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式によって記述できることを示している。しかし、面直磁場励起の場合において、低磁場の場合についてはモデルと一致せず何か別の機構があると考えられる。

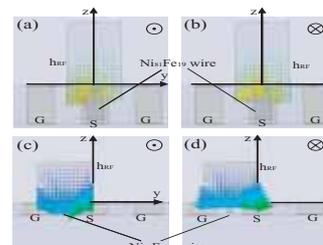


図 2 高周波磁場の空間分布

(a)(b) 面内磁場励起

(c)(d) 面直磁場励起

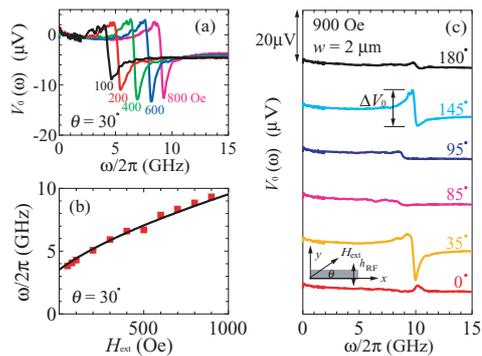


図3 面内磁場励起による細線ならびにコプレーナガイド電極に発生した直流電圧信号の高周波周波数ならびに外部磁場依存性

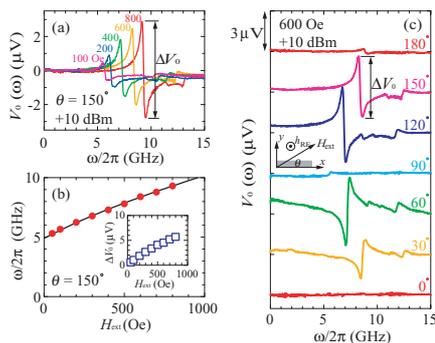


図4 面直磁場励起による細線ならびにコプレーナガイド電極に発生した直流電圧信号の高周波周波数ならびに外部磁場依存性

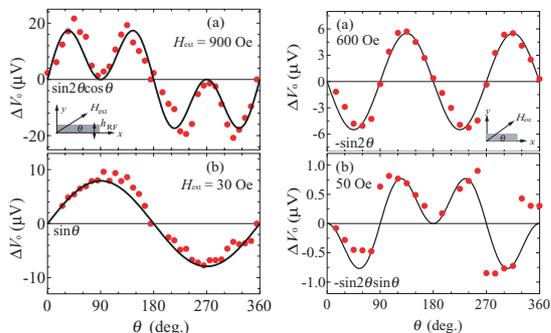


図5 高周波面内磁場励起による直流電圧信号 ΔV_0 の外部磁場印加角度依存性

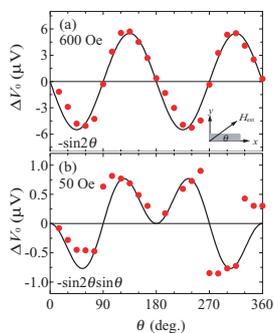


図6 高周波面内磁場励起による直流電圧信号 ΔV_0 の外部磁場印加角度依存性

以上のように、ナノ・マイクロスケールの強磁性体の強磁性共鳴を励起し、その共鳴信号を電気的に検出することができた。

さらにマイクロ波と直流電流を同時に入力したときに得られる直流電圧信号を物理的な解析モデルから解析し、強磁性共鳴時にスピン電流によるトルクの大きさと高周波磁場の効果を分離・大きさを評価する手法を確立した[5]。

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 6 件) 以下、すべて査読有

- 1) A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima and Y. Nakatani, "Magnetic field dependence of rectification radio frequency current flowing through a single layered ferromagnetic wire", J. Appl. Phys. **105** (2009) 07D301-1-3.
- 2) A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, H. Miyajima, Y. Miyashita and Y. Sanada, "Broadband ferromagnetic resonance of $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ wires using a rectifying effect", Phys. Rev. B **78** (2008) 104401-1-11.
- 3) A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, N. Higashio and H. Miyajima, "DC electrical response and impedance change induced by a microwave signal in a patterned ferromagnetic wire", Proceedings of SPIE **7036** (2008) 703607-1-15.
- 4) 山口明啓, 宮島英紀, "強磁性細線におけるマイクロ波励起による直流電圧発生現象", 日本磁気学会誌, **32** (2008), 334-337.
- 5) A. Yamaguchi, H. Miyajima, T. Ono, Y. Suzuki, and S. Yuasa, "The rectification of radio-frequency signal by magnetic domain wall in a single-layered ferromagnetic nanowire", Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 132509-1-3.
- 6) A. Yamaguchi, H. Miyajima, S. Kasai and T. Ono, "Self-homodyne rf demodulator using a ferromagnetic nanowire", Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 212505-1-3.

〔学会発表〕(計 20 件)

- 1) 山口明啓, 元井桂一, 東尾奈々, 宮島英紀, "微小人工物質作製とその電磁波応答", 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学
- 2) 山本栄也, 岸本智亮, 笠谷雄一, 山口明啓, 宮島英紀, "強磁性単結晶細線における結晶磁気異方性と磁壁移動", 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学
- 3) 元井桂一, 山口明啓, 宮島英紀, "強磁性細線 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ における直流交流電流励起による異常ホール効果とスピン波励起", 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学
- 4) 笠谷雄一, 元井桂一, 山口明啓, 宮島英紀, "強磁性細線 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ における直流交流電流励起による異常ホール効果とスピン波励起(実験)", 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学
- 5) A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima and Y. Nakatani, "Field dependence of rectification of

- radio frequency current in a single layered ferromagnetic wire”, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2008年11月13日, Hilton Austin, Austin, Texas, USA
- 6) 山口 明啓, 元井 桂一, 東尾 奈々, 宮島 英紀, “微小人工物質の電磁波応答”, 日本物理学会 2008年 秋季大会, 2008年9月21日, 岩手大学
 - 7) 鹿海 敦, 山口 明啓, 宮島 英紀, “金属微小リングの量子干渉効果”, 日本物理学会 2008年 秋季大会, 2008年9月21日, 岩手大学
 - 8) 山本 栄也, 岸本 智亮, 笠谷 雄一, 山口 明啓, 宮島 英紀, “強磁性細線における異方的ポテンシャル下の磁壁移動”, 日本物理学会 2008年 秋季大会, 2008年9月21日, 岩手大学
 - 9) 山口 明啓, 東尾 奈々, 元井 桂一, 宮島 英紀, “強磁性細線の高周波インピーダンス測定”, 日本磁気学会 第32回学術講演会, 2008年9月15日, 東北学院大学
 - 10) 笠谷 雄一, 山本 栄也, 岸本 智亮, 山口 明啓, 宮島 英紀, “磁壁移動における結晶磁気異方性の影響について”, 日本磁気学会 第32回学術講演会, 2008年9月13日, 東北学院大学
 - 11) A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, N. Higashio and H. Miyajima, “DC electrical response and impedance change induced by a microwave signal in a patterned ferromagnetic wire”, SPIE, 2008年8月10日, San diego convention center, USA
 - 12) 山口 明啓, 元井 桂一, 宮下 陽太, 宮島 英紀, “強磁性細線の共鳴直流電圧発生法による強磁性共鳴測定”, 応用物理学会 春季第55回 学術講演会, 2008年3月29日, 日本大学 理工学部 船橋キャンパス
 - 13) 元井 桂一, 山口 明啓, 宮島 英紀, “強磁性細線における電流誘起スピン波共鳴現象”, 応用物理学会 春季 第55回 学術講演会, 2008年3月29日, 日本大学 理工学部 船橋キャンパス
 - 14) 東尾 奈々, 山口 明啓, 宮島 英紀, 水口 将輝, 小野 輝男, 鈴木 義茂, 湯浅 新治, “強磁性細線のノイズ測定”, 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学 東大阪キャンパス
 - 15) 宮下 陽太, 山口 明啓, 宮島 英紀, “強磁性FeNi 細線におけるマイクロ波誘起スピンドYNAMIKSの磁場依存性”, 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学 東大阪キャンパス
 - 16) 岸本智亮, 山本栄也, 山口明啓, 宮島英紀, “強磁性細線における異方的ポテンシャル下の磁壁移動”, 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学 東大阪キャンパス
 - 17) 岩間大輔, 山口明啓, 宮島英紀, “高周波電流

- 駆動法による強磁性 NiFe ナノ細線の磁壁移動とピニング”, 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学 東大阪キャンパス
- 18) 山口 明啓, 東尾 奈々, 元井 桂一, 宮島 英紀, “ナノ磁性体の高周波応答について”, 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学 東大阪キャンパス
 - 19) A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, “Direct current voltage induced by microwave signal in a ferromagnetic wire”, IEEE Metallic Multilayers 2007, 2007年10月17日”, University of Western Australia, Perth, Western Australia, Australia
 - 20) 山口 明啓, 宮島英紀, “ナノ磁性体における高周波電力誘起直流電圧”, 応用磁気学会 第31回学術講演会, 2007年9月14日, 学習院大学

〔その他〕

山口明啓, 東尾奈々, 宮島英紀, “ナノ磁性体における高周波電磁応答特性について - 磁気構造制御と高周波応答 -”, MWE2008 マイクロウェーブ展 2008 での発表ならびに会議予稿, 2008年11月27日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 明啓 (YAMAGUCHI AKINOBU)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号：70423035

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし