

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2009

課題番号：19204039

研究課題名（和文） マイクロ波領域におけるナノ磁性体の輸送特性とスピンドायオード効果の研究

研究課題名（英文） Transport Phenomena and Spin-diode effect of Nano-scale ferromagnets in a micro-wave frequency region

研究代表者

宮島 英紀 (MIYAJIMA HIDEKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：30080451

研究成果の概要（和文）：

単層強磁性パーマロイ $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{18}$ ナノ・ワイヤーとナノ・ディスクのマイクロ波領域における輸送現象とスピンドायオード効果について調べ、さらにナノ・メタマテリアルの可能性について追求した。マイクロ波を印加することによって強磁性共鳴状態が実現すると、細線両端に直流電圧が発生し、検波素子として活用できる可能性があること、この手法は微細な磁気構造を非常に敏感に検出する方法として有用であること、などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The transport phenomena and spin-diode effect of a single layered ferromagnetic $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{18}$ nano-wires and nano-disks in a radio-frequency (RF) frequency region are investigated. The microwave rectifying effect in single layered ferromagnetic wires is induced by the anisotropic magnetoresistance oscillation due to the magnetization dynamics in the wires. This rectifying effect provides sensitive detection for the magnetization dynamics in nano- or micron scale magnets.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	22,900,000	6,870,000	29,770,000
2008年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 4303

キーワード：ナノ強磁性体,スピントロニクス,メタマテリアル,スピンドायオード効果

1. 研究開始当初の背景

1990年以降,ナノ微細加工技術の進展に伴い,ナノメートルスケール(10^{-9}m)で磁気構造を人工的に精密制御した磁性体(いわゆる“ナノ磁性体“)の作製が可能となった。ナノ磁性体ではナノスケールで磁気的な構造を装飾変調すると,そのサイズ・形状・変調構造が磁気的特性長や特性時間・特性周波数と交錯して興味深い磁気的特性を発現する。

従来,ナノ磁性体の輸送特性は主として直流・低周波領域(DC~1MHz)で調べられてきた。しかし,数十MHzからマイクロ波域(数十GHz)での輸送現象には,磁壁共鳴分光(0~50MHz),FeNi磁気円盤の磁気渦励起(0~500MHz)やスピントルクダイオード効果(0~10GHz)など興味深い現象が関連している。

これらの現象は,学術的のみならずMRAMやメタマテリアルをはじめとした応用とも密接に関連しており興味を持たれてきた。

2. 研究の目的

3年の研究期間に次のことを明らかにする。

- (1)マイクロ波域における磁気輸送特性を解明する。
- (2)マイクロ波域におけるスピンドダイオード効果が発生する機構を究明する。
- (3)強磁性ドット,多重磁気細線など形状を制御し,ナノ磁性体におけるメタマテリアルの可能性を追求する。
- (4)周波数掃引型の強磁性共鳴測定とナノ磁性体におけるマグノン素励起について研究する。

マイクロ波域の磁化挙動を明らかにすることは,今後ダイナミックな動的磁化過程の究明を必要とするスピントロニクスなど応用面でも重要である。たとえば,強磁性共鳴を利用したスピントランスファー効果や逆スピホール効果などに基礎的な理解と設計

方針を与えることが期待できる。また,メタマテリアルとして実現されれば,アイソレータ,サーキュレーターやジャレーターなどのマイクロ波制御素子として発展するかもしれない。

3. 研究の方法

(1)マイクロ波測定環境の整備

ベクトルネットワーク・スペクトラムアナライザーシステムとミニ電子ビーム蒸着装置の整備を行う。

(2)マイクロ波領域での輸送特性の測定・解析
FeNi強磁性細線の基本的な特性の周波数依存性と外部磁場依存性を測定する。

(3)ナノ磁性体がメタマテリアルとなる可能性に対する予備的探索し,どのような周期構造を形成すれば,特定の周波数領域で透磁率と誘電率の一方あるいは両方が負になる条件を形成できるか? 周期構造などに空間的非対称性を持たせることで,マイクロ波伝送特性に非対称性をもたらすことができるか(アイソレータなどへの適用は可能か)などの点から試料を作製する。

4. 研究成果

(1) 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

強磁性 $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{18}$ 細線にマイクロ波電力を入力すると細線長軸方向ならびに短軸方向に磁気モーメントの歳差運動に起因する抵抗変化により,直流電圧発生現象が観測できた。現象論的なモデルと定性的な一致を示した。細線内部で離散化したスピン波モードをマイクロ波印加により励起される。さらに直流電流を重畳することによって,異なるスピン波モードを励起できることを明らかにした。

(2) ナノ磁性体の高周波電磁応答特性(メタマテリアルの可能性)

人工ナノ強磁性体,特に強磁性 $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{18}$ 細線のマイクロ波応答を実験的に調べ,スピン波に立脚した解析モデルと比較して現象を調べた。マイクロ波を印加することによって強磁性共鳴状態が実現すると,細線両端に直流電圧が発生し,検波素子として活用できる可能性がある。また,この手法は,微細な磁気構造を非常に敏感に検出するスペクトロスコピーとしても有用である。従来のメタマテリアルの概念にとどまらず,試料材料そのもののマイクロ波応答を組み合わせることによって,新しい特性を有するメタマテリアルの創出や素子開発応用のヒントを与えるものと考えられる。

ナノ磁性細線は,高周波信号に対して目的の信号周波数成分を自己復調することができ,素子の単純化や部品の低減ができる。スピンバルブ構造素子やトンネル接合素子でも同様なことが可能であるが,構造が単純でインピーダンス整合等も取りやすく回路設計・製造に適している。

(3) プレナーホール整流効果と人工磁性体の非線形応答

強磁性 $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{18}$ 磁気円盤における磁気渦の動的挙動について,プレナーホール電圧の整流効果を用いて検出することに成功した。外部静磁場や直流電流を印加することによって,共鳴周波数を変調し,スペクトル形状が対称から非対称な構造に操作することができる。この現象は,磁気渦中心の動的挙動そのものが作り出す self-bistability による効果であることが実験結果と解析モデルから説明できる。微小人工磁性体の基本的な物理の理解をこの電気的な手法で,さらに深めていくことが必要である。また,共鳴周波数や半値幅を電流で制御できることから,新しい機能性素子としての可能性が期待される。

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 16 件)

A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, T. Sato and Y. Nakatani, "Non-linear Vortex Motion Induced by the Simultaneous Application of rf and dc Currents in a Micron-sized $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ Disk" IEEE Transaction on Magnetics (2010) in press, 査読有

H. Yamamoto, Y. Kasatani, A. Yamaguchi and H. Miyajima, "Giant Magnetoresistance Effect Detection of Magnetization Reversal in Single Crystalline Nanowires", Journal of Physics: Conference Series **200** (2010) 042028-1-4, 査読有

A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, A. Hirohata, T. Yamaoka, T. Uchiyama and Y. Utsumi, "Current manipulation of a vortex confined in a micron-sized $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ disk", Applied Physics Letters **95** (2010)122506, 査読有

A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata and H. Miyajima, "Anomalous Hall voltage rectification and quantized spin-wave excitation induced by simultaneous application of dc and rf currents in a single-layered $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ nanoscale wire", Physical Review **B79** (2009) 224409-1-11, 査読有

山岡武博, 蓮村聡, 安藤和徳, 田村政史, 辻川葉奈, 山口明啓, 宮島英紀, "直交2軸電磁石型磁場印加 MFM の開発と磁区構造解析への応用", 日本磁気学会誌 **33**(2009)298-303, 査読有

K. Sekiguchi, A. Yamaguchi, H. Miyajima, A. Hirohata, S. Usui, "Observation of a

bias-dependent constrained magnetic wall in a Ni point contact”, Physical Review **B78** (2009) 224418-1-5, 査読有

A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima and Y. Nakatani, ”MAGNETIC FIELD DEPENDENCE OF RECTIFICATION RADIO FREQUENCY CURRENT FLOWING THROUGH A SINGLE LAYERED FERROMAGNETIC WIRE”, Journal of Applied Physics **105** (2009) 07D301-1-3, 査読有

A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, N. Higashio, H. Miyajima, ”DC electrical response and impedance change induced by a microwave signal in a patterned ferromagnetic wire”, Proc. SPIE **7036** (2008) 703607-1-15, 査読有

A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata, H. Miyajima, Y. Miyashita and Y. Sanada, ”Broadband ferromagnetic resonance of Ni₈₁Fe₁₉ wires using a rectifying effect”, Physical Review **B33** (2008) 104401-1-11, 査読有

A. Yamaguchi, H. Saito, M. Shimizu, H. Miyajima, S. Matsumoto, Y. Nakamura, and A. Hirohata, ”A silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor Hall bar for scanning Hall probe microscopy”, Review of Scientific Instruments **79** (2008) 083703-1-6, 査読有

K. Sekiguchi, A. Yamaguchi, H. Miyajima, and A. Hirohata, ”Effect of ferromagnetism on AB oscillations in a normal-metal ring”, Physical Review **B77** (2008)1404(R)-1-4, 査読有

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”, 日本磁気学会誌 **32**(2008)334-337, 査

読有

A. Yamaguchi, H. Miyajima, T. Ono, Y. Suzuki, S. Yuasa, ”The rectification of radio-frequency signal by magnetic domain wall in a single-layered ferromagnetic nanowire”, Applied Physics Letters **91** (2007)132509-1-3, 査読有

A. Yamaguchi, H. Miyajima, S. Kasai, and T. Ono, ”Self-homodyne rf demodulator using a ferromagnetic nanowire”, Applied Physics Letters **90** (2007)212505-1-3, 査読有

M. Tanaka, K. Itoh, H. Iwamoto, A. Yamaguchi, H. Miyajima, and T. Yamaoka, ”Magnetic Properties of nanometer-scale FeNi antidot array system”, J. Magn, Magn. Mater. **310** (2007) 792-793, 査読有

A. Yamaguchi, H. Miyajima, T. Ono, Y. Suzuki, S. Yuasa, A. Tulapurkar, and Y. Nakatani, ”Rectification of radio frequency current in ferromagnetic nanowire”, Applied Physics Letters **90** (2007) 182507-1-3, 査読有

[学会発表](計46件)

A. Yamaguchi, H. Hata, H. Miyajima, T. Sato, Y. Nakatani, A. Hirohata, T. Yamaoka, T. Uchiyama and Y. Utsumi, ”Self-homodyne detection of Multi-vortex motion induced by rf current in micron-sized Fe₁₉Ni₈₁ ellipse dots”, 11th Joint MMM-Intermag conference (2010年1月22日, Washington, DC)

A. Hirohata, A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima, T. Uchiyama and Y. Utsumi, ”DC electrical response induced by the simultaneous application of ac and dc currents in artificial ferromagnets”, IEEE International Magnetism Conference 2009

(2009年5月8日, Sacramento Convention Center, Sacramento, California, USA)

Keiichi Motoi, Akinobu Yamaguchi, Atsufumi Hirohata and Hideki Miyajima, "Detection of Current-Induced Spin-Wave Excitation using Rectification Effect in Nano-Magnets", International Conference on Magnetism (2009年7月27日, Karlsruhe, Germany)

A. Yamaguchi, K. Motoi, A. Hirohata and H. Miyajima, "ANOMALOUS HALL VOLTAGE RECTIFICATION EFFECT INDUCED BY SPIN-WAVE EXCITATION", 20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (2009年7月22日, Freie Universitat Berlin, Berlin, Germany)

Akinobu Yamaguchi, Keiichi Motoi, Hideki Miyajima, Tsuyoshi Uchiyama and Yuichi Utsumi and Atsufumi Hirohata, "Electromagnetic Propagation in Artificial Magnets", International Conference on Magnetism (2009年7月28日, Karlsruhe, Germany)

Akinobu Yamaguchi, Keiichi Motoi, Atsufumi Hirohata and Hideki Miyajima, "Detection of Quantized Spin-Wave Excitation by Anomalous Hall voltage Rectification in Nano-Magnets", International Conference on Magnetism (2009年7月28日, Karlsruhe, Germany)

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)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

発明の名称: 微小磁性体複合強磁性共鳴を用いた小インダクタ

出願番号: 特願 2008-233657

発明者: 山口明啓, 宮島英紀, 東尾奈々, 元井桂一

出願人: 慶應義塾大学

種類: 特許

出願日: 2008年9月11日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮島英紀 (MIYAJIMA HIDEKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 30080451

(2) 研究分担者

山口明啓 (YAMAGICHI AKINOBU)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号: 70423035

(3) 連携研究者

該当なし