

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760002

研究課題名 (和文) 強磁性体リングメモリの静磁的相互作用によるカイラリティ制御

研究課題名 (英文) Chirality control of ferromagnetic ring memory by magnetostatic interaction

研究代表者

好田 誠 (KOHDA MAKOTO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00420000

研究成果の概要 (和文)：

ナノサイズの強磁性体リング構造では、Onion 状態と Vortex 状態という特徴的な磁化状態を有する。特に磁化がリング周に沿う Vortex 状態では、リング端からの漏洩磁場が抑制され、かつ磁気モーメントの回転方向により右/左回り磁化状態(カイラリティ)を有することから、高密度磁気記録媒体への応用が期待されている。外部から印加する面内磁場方向を端子が接続されているリングの対称軸からずらすことで、Vortex 状態のリングカイラリティを電氣的に検出可能であることを理論・実験から明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

In nanosized ferromagnetic ring structures, there are two characteristic magnetic states called Onion state and Vortex state. Especially, in Vortex state, magnetic moment aligns around the ring perimeter, resulting in the suppression of the stray field from the ring edge. Magnetic moment aligns either clockwise or counter clockwise directions and plays an important role for the application of high density memory cells.

We proposed the electrical detection of chiral direction (clockwise and counter clockwise directions in the Vortex state). By applying the in-plane magnetic field to be asymmetric to the ring structure, we can detect either clockwise or counter clockwise direction by detecting the magneto-resistance change.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010 年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：強磁性体リング構造、カイラリティ制御、Vortex 状態、Onion 状態、静磁的相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

ナノサイズの強磁性体リング構造では、Onion 状態と Vortex 状態という特徴的な磁化状態を有する。特に、図 1 に示す磁化がリン

グ周に沿う Vortex 状態では、リング端からの漏洩磁場が抑制され、かつ磁気モーメントの回転方向により右/左回り磁化状態(カイラリティ)を有することから、高密度磁気記

録媒体への応用が期待されている。情報記録を担うカイラリティ制御には、これまで切り欠けなど構造に非対称性を加える手法が用いられてきたが、その場合 Vortex 状態においてもリング端面から漏洩磁場が発生するため、リング構造の特徴である漏洩磁場の抑制を両立することは出来なかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、強磁性体/非磁性体/強磁性体 3 層リングにおける上下強磁性層の静磁的相互作用を活用し、強磁性体リングの形状自体を変化させること無く Vortex 状態におけるカイラリティ制御を行う。リング形状を保持したままカイラリティ制御可能であるため Vortex 状態でも漏洩磁場が発生せず高密度記録化が可能となる。

## 3. 研究の方法

2009年度は、Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層リング構造において静磁的相互作用が得られるリング内径・膜厚の構造最適化に注力する。具体的には、マイクロマグネティックシミュレーションにより Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層リング構造に磁化反転機構を明らかにし、リング内径依存性から上下 Co 層の静磁的相互作用が働く条件を探索する。その後、電子ビーム描画及び電子ビーム蒸着を用いて Co リングアレイを作製し、磁気光学カー効果による光学測定から静磁的相互作用に起因した磁化過程の変化を実験的に明らかにする。2010年度は、カイラリティ検出に向けた磁気抵抗測定を実施する。単一 Co<sub>3</sub> 層リング構造に 4 端子プローブを接続し、リング形状の複数個所を同時測定することで磁化状態の時間変化が検出可能となる。どの箇所から時計及び反時計周りに磁化反転が生じるかを決定することができるためカイラリティの電気的検出が可能となる。

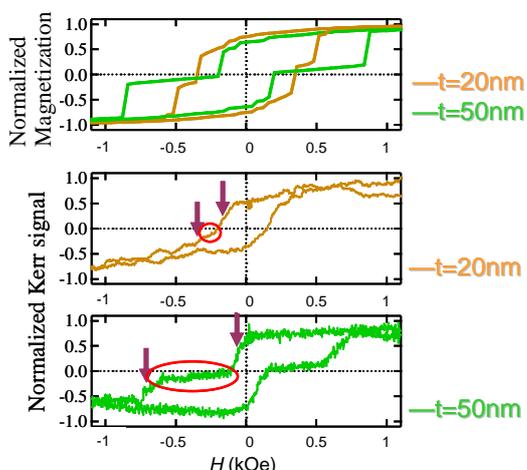


図 1. 膜厚(t)20, 50nmCo リング構造における磁化過程の LLG シミュレーション結果と MOKE 測定結果。

## 4. 研究成果

Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層リング構造の磁化反転では互いの Co 層における Vortex 状態に保磁力差をつける必要がある。そこで、膜厚の異なる単層 Co リング構造における磁化過程を磁気光学カー効果(MOKE)と LLG シミュレーションにより評価した。その結果を図 1 に示す。リング外径は 1.6  $\mu\text{m}$ 、内径 0.8  $\mu\text{m}$  のリング構造とした。LLG シミュレーション結果から Co 膜厚を変えても Onion 状態と Vortex 状態を取る磁化過程を示すことが分かる。漏洩磁場がなくなり磁化がゼロ付近となる Vortex 状態に着目すると、膜厚の薄い 20nmCo リングでは Vortex 状態をとる磁場領域が 50nm のそれと比較し狭いことが分かり、膜厚を変化させることで保磁力差を付加できることが理論的に示された。そこで、電子ビーム描画装置により上記サイズの Co 単層リング構造を作製し、その磁化過程を MOKE により評価した。図 1 に示す矢印の領域が各膜厚における Vortex 状態を示し、理論結果と同様に実験でも膜厚の薄い 20nmCo リングにおいて Vortex 状態の磁場領域が狭まることが分かった。よって、この 2 種類の膜厚を用いて Co<sub>3</sub> 層リング構造を作製し、巨大磁気抵抗(GMR)効果による磁化過程の評価とカイラリティの電気的検出を試みた。

図 2 に Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層構造のサイズと作製したリング構造の走査型電子顕微鏡写真を示す。

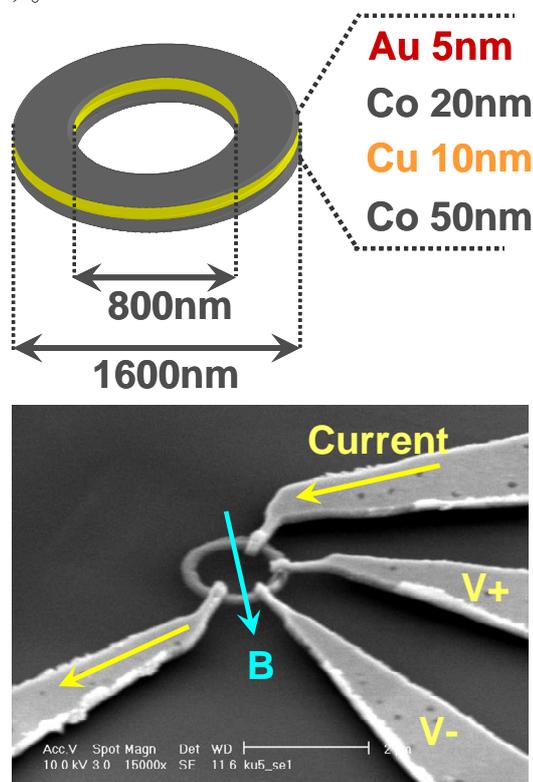


図 2. 作製した Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層リング構造(上図)とその SEM 写真(下図)

強磁性 Co 膜厚は 20, 50nm、中間層 Cu 膜厚は 10nm、最表面には酸化防止のため Au5nm をスパッタ装置により成膜した。時期抵抗測定には SEM 写真で見られるように非磁性 Cr/Au プローブ端子を電子ビーム蒸着法により作製し、4 端子測定を行った。我々は Vortex 状態の磁気カイラリティ電氣的検出を実現するにあたり、電圧端子で検出される磁気抵抗変化について理論計算を行った。リングに対する磁場方向、電流端子、そして電圧端子の関係を図 3 に示す。

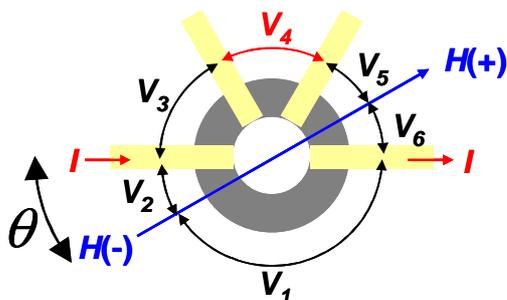


図 3. リング構造における面内磁場方向、電流・電圧端子の関係。

電圧端子に生じる  $V_4$  は、

$$V_4 = \frac{R_4 \times (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} I \quad (1)$$

であらわされる。 $R_x$  は図 3 に示す各リング部分の抵抗に対応する。リングの磁気抵抗変化は  $R_x$  の並列回路として記述することができるため、 $V_4$  の電圧変化は  $R_1$  と  $R_2$  にも依存することが分かる。面内磁場角度  $\theta = 0^\circ$  の場合の磁気抵抗変化を図 4 に示す。

上下 Co 層において Vortex 状態があらわれる b と d 状態 (図では反時計回り: CCW) は同じ抵抗値を示す。時計回り (CW) の磁化状態でも図 4 と同一の磁気抵抗変化となるため、カイラリティの電氣的検出が出来ない。一方、面内磁場角度  $\theta = 30^\circ$  の場合の結果を図 5 に示す。b と d の状態は同じ反時計回りの Vortex 状態でも抵抗値が異なることが分かる。反時計回りと時計回りの Vortex 状態全ての組み合わせ

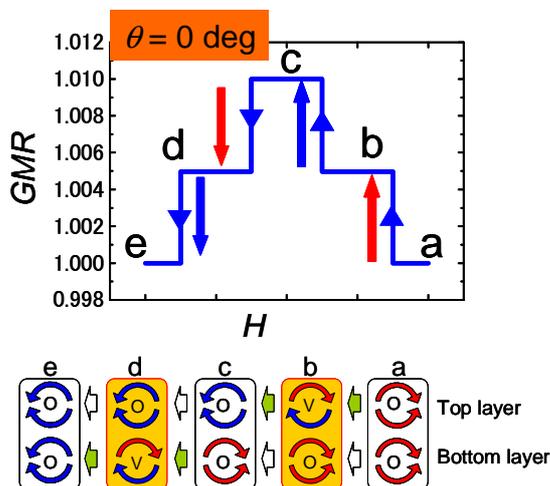


図 4. 面内磁場角度  $0^\circ$  における磁気抵抗変化の理論計算。各磁気抵抗における磁化状態を a-e で示す。

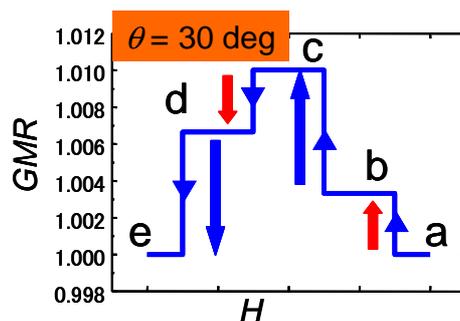


図 5. 面内磁場角度  $30^\circ$  における磁気抵抗変化の理論計算。

せ考えた場合の磁気抵抗変化の理論計算結果を図 6 に示す。Vortex 状態のカイラリティによって Vortex 状態であらわれる b と d の磁気抵抗が全て異なることが明らかとなった。これより、印加面内磁場の角度により

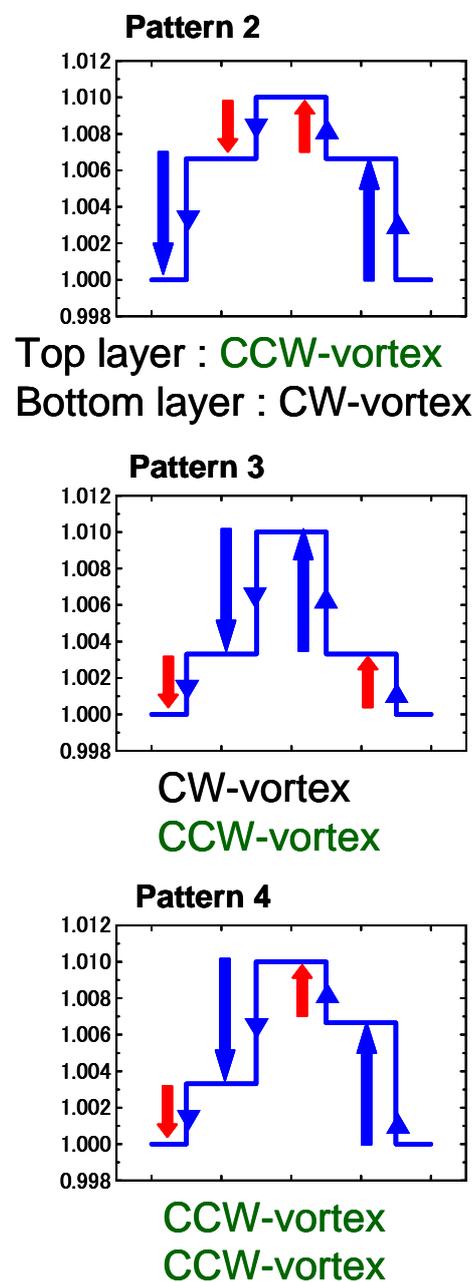


図 6. 面内磁場角度  $30^\circ$  において異なるカイラリティ状態を考えた場合の磁気抵抗変化の理論計算。

Vortex 状態におけるカイラリティを電氣的に検出できることが分かる。そこで面内磁場角度を  $30^\circ$  にセットし室温における磁気抵抗測定を行った。その結果を図 7 に示す。磁気抵抗変化の形状は上下 Co 層の Vortex 状態がどちらも反時計回りの場合(図 5)に対応することから、カイラリティの電氣的検出が実現できたことが分かる。さらに同じ測定を何度も繰り返して行った場合、同様の磁気抵抗変化が 75% の確率であらわれた。単層強磁性体リングの場合では、時計回り・反時計回りの Vortex 状態も等しい磁気エネルギーを示すことから、あらわれる確率は 50% となる。Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層構造において反時計回りのほうが安定にあらわれたことは上下層の静磁的

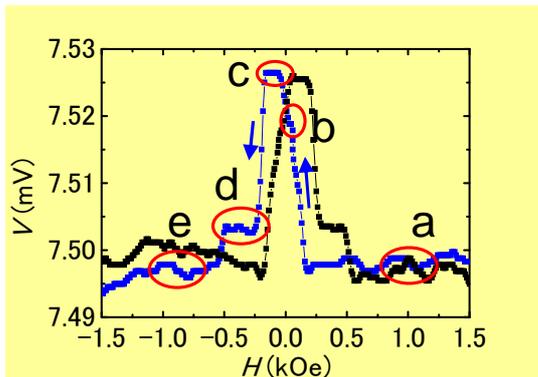


図 7. 面内磁場角度  $30^\circ$  における Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層構造における磁気抵抗測定結果。図 4 に示した磁化状態 (a-e) に対応する磁気抵抗を a-e で示す。

な相互作用に起因していると考えられる。マイクロマグネティックシミュレーションより、3 層リング構造の磁化過程について理論計算したところ、Onion 状態におけるリング端からの漏洩磁場によって Vortex 状態のカイラリティ制御が可能であることが明らかとなった。これより、実験的に得られている反時計回りの Vortex 状態の安定性は上下 Co 層の Onion 状態における静磁的相互作用に起因していると考えられる。

#### 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 2 件)

1. J. Takagi, M. Kohda, and J. Nitta, Electrical spin manipulation with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate insulator in InGaAs based mesoscopic ring arrays Physics Procedia 3, 1317-1320 (2010).(査読有)
2. M. Kohda and J. Nitta, Enhancement of spin orbit interaction and the effect of interface diffusion in quaternary InGaAsP/InGaAs heterostructures Physical Review B 81, 115118(1)- 115118(8) (2010).(査読有)

[学会発表] (計 5 件)

1. 国橋要司、好田誠、新田淳作, InGaAs 量子井戸におけるスピン緩和の量子井戸幅依存性第 71 回応用物理学会学術講演会 2010 年 9 月 25 日長崎大学
2. S. Moulis, M. Kohda, M. Scheid, K. Richter, and J. Nitta, Interplay between Zeeman field and spin orbit induced magnetic field in InGaAs based narrow wires International conference on physics and semiconductors 2010 2010 年 7 月 27 日 Korea
3. M. Kohda, T. Shibata, and J. Nitta, Spin Orbit Interaction in an In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As Shallow Two Dimensional Electron Gas for Spin Injection and Detection International conference on physics and semiconductors 2010 2010 年 7 月 27 日 Korea
4. T. Miyawaki, Y. Watanabe, M. Kohda, K. Saito, S. Mitani, K. Takanashi, and J. Nitta, Magnetoresistance of magnetically coupled multilayered rings 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009) 2009 年 10 月 8 日 Sendai
5. 宮脇哲也, 渡邊祐介, 好田誠, 齊藤今朝美, 三谷誠司, 高梨弘毅, 新田淳作, Co/Cu/Co<sub>3</sub> 層リング構造の磁気特性における Co 層間の静磁的相互作用の影響 第 70 回応用物理学会関係学術講演会 2009 年 9 月 8 日 富山大学

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 電氣的な電子スピン注入方法

発明者: 好田 誠、新田 淳作

権利者: JST

種類: 特願

番号: 2010-187603

出願年月日: 2010 年 8 月

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~kotaib/kohda.html>

受賞

1. 好田 誠 第20回トーキン科学技術振興財団研究奨励賞 “電氣的スピンの注入・スピン制御に関する研究” 平成22年3月
2. 好田 誠 第50回 本多記念会 原田研究奨励賞 “電氣的スピンの注入・スピン制御に関する研究” 平成22年4月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

好田 誠 (KOHDA MAKOTO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：00420000

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

新田 淳作 (NITTA JUNSAKU)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00393778