

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760249

研究課題名(和文) 面内磁化膜における内因性ピンング

研究課題名(英文) Intrinsic pinning in in-plane magnetized film

研究代表者

山ノ内 路彦(Yamanouchi, Michihiko)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40590899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：面内磁化膜において電流誘起磁壁移動の閾値電流の内因性ピンング、及び外因性ピンング依存性を調べるため、必要な積層膜の作製方法と素子構造を検討した。そして外因性ピンングが内因性ピンングより小さい面内磁化膜細線の作製方法、及び面内磁化膜細線において電流磁場を利用して細線内に磁壁を初期配置する構造を提案した。また、それらの知見をもとに面内磁化膜において電流誘起磁壁移動を調べるための素子を試作した。

研究成果の概要(英文)：To determine the intrinsic pinning and extrinsic pinning dependences of threshold current for the current-induced domain wall motion in in-plane magnetized films, fabrication method of stacking structure and device structure was studied. I proposed a fabrication method of films realizing that the extrinsic pinning is weaker than the intrinsic pinning and device structure to prepare a domain wall in in-plane magnetized wire by using Oersted field. An in-plane magnetized wire having an Oersted field line to create a domain wall was fabricated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子・電気材料工学

キーワード：電流誘起磁壁移動

1. 研究開始当初の背景

強磁性体中には磁化方向(磁性スピンの方向)の揃った磁区と呼ばれる領域が形成され、異なる磁化方向を有する磁区間には磁壁と呼ばれる遷移領域ができる。磁壁は磁場印加によって移動することは知られていたが、1984年L. Bergerにより磁壁に電流を印加すると、電流と同方向または逆方向に磁壁が移動することが提唱された(L. Berger, J. Appl. Phys. **55**, 1954 (1984).)。これは電流誘起磁壁移動と呼ばれ、電子スピンと磁性スピン間の交換相互作用と角運動量保存則に起因する。磁壁が移動すると磁化方向を反転できるため、磁化方向として情報を保持するスピントロニクス素子の書き込み手法として注目されている。そして、近年では電流誘起磁壁移動を利用した記憶素子や演算素子の開発が進められている。

電流誘起磁壁移動の機構として、電子スピンと磁性スピン間の角運動量保存則に起因するスピントランスファトルクと磁壁内における電子スピンのスピン緩和、及び運動量緩和に起因する非断熱項によるトルクの2種類のトルクが考えられている(G. Tatara and H. Kohno, Phys. Rev. Lett. **92**, 086601 (2004). S. Zhang and Z. Li, Phys. Rev. Lett. **93**, 127204 (2004). A. Thiaville *et al.*, Europhys. Lett. **69**, 990 (2005).)。電流誘起磁壁移動では、ある閾値電流密度 J_c 以上の電流密度を印加することにより磁壁は移動する。前者のトルクで磁壁が移動する場合、 J_c は困難軸方向の磁気異方性エネルギーに比例する。これは磁壁のピンングサイトなどがなくても J_c 以下の電流密度では磁壁移動は起こらないことを示しており、内因性ピンングと呼ばれる。後者のトルクで磁壁が移動する場合には、 J_c は外部磁場による磁壁移動と同様に磁壁のピンング(外因性ピンング)の大きさに依存する。

膜面内方向に磁化容易軸をもつ NiFe 細線では、実験から求められた J_c は 10^{11} - 10^{12} A/m² であるのに対して(A. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 077205 (2004).)、前述の内因性ピンングによる J_c を計算すると 10^{13} A/m² 程度となり、実験結果よりも1-2桁大きな値となる。そのため、非断熱項によるトルクが働き(S. Zhang and Z. Li, Phys. Rev. Lett. **93**, 127204 (2004).)、面内磁化の NiFe 細線における J_c は外因性ピンングに依存すると考えられている(A. Thiaville *et al.*, Europhys. Lett. **69**, 990 (2005).)。一方、強磁性半導体(Ga, Mn)As や強磁性金属 Co/Ni 積層膜においては、 J_c の大きさは内因性ピンングでよく説明できる(M. Yamanouchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 096601 (2006). T. Koyama *et al.*, Nature Mater. **10**, 194

(2011).)。このように磁化方向の違いによって異なる機構に起因した J_c が観測される原因はわかっておらず、現状、垂直磁化膜、及び面内磁化膜における電流誘起磁壁移動の機構を統一的に説明できていない。

2. 研究の目的

垂直磁化膜の細線においては、電流誘起磁壁移動の J_c は内因性ピンングで説明可能であるが、面内磁化膜細線においては、 J_c は外因性ピンングに依存すると考えられている。この原因として面内磁化膜細線においては、内因性ピンングから予想される J_c が外因性ピンングによる J_c よりも大きいことが考えられるが、これを示す実験はなされていない。本研究では、内因性ピンング、及び外因性ピンングの大きさの異なる面内磁化膜細線を作製し、 J_c の内因性ピンング、外因性ピンング依存性を調べることにより、磁化方向の違いで異なる機構の J_c が観測される原因を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

内因性ピンングによる J_c は、困難軸方向の磁気異方性エネルギー密度 K と磁壁幅 w に比例し、スピン偏極率 P に反比例する。垂直(面内)磁化膜における困難軸方向の磁気異方性エネルギーは、磁壁内のスピンを磁壁の幅方向(膜面垂直方向)に向けるために必要なエネルギーに対応する。一般に w は強磁性薄膜の膜厚よりも1-2桁厚いため、面内磁化膜における困難軸方向の磁気異方性エネルギー密度 K は、垂直磁化膜よりも1-2桁大きい。また、 w は磁気異方性エネルギーの平方根に反比例するため、磁気異方性エネルギーの大きな垂直磁化膜における磁壁幅は面内磁化膜よりも1桁程度厚い。スピン偏極率については、巨大磁気抵抗効果素子の磁気抵抗比は P に関係するが、垂直磁化膜、面内磁化膜で大きく変わらないため、 P は垂直磁化膜、面内磁化膜で同程度と考えられる。したがって、垂直磁化膜細線の内因性ピンングによる J_c は面内磁化膜細線よりも2-3桁低くなると考えられる。しかし、面内磁化膜と垂直磁化膜における閾値電流密度の実験値は同程度である。この原因として、面内磁化膜では外因性ピンングによる J_c が内因性ピンングによる J_c よりも小さいことが推察される。これを確認するためには、内因性ピンング、及び外因性ピンングの大きさを変えた面内磁化膜細線を作製し、面内磁化膜における J_c の内因性ピンング、及び外因性ピンング依存性を明らかにすることが必要である。

まず、内因性ピンング、及び外因性ピンングの大きさを変えた面内磁化膜の作製方法を探索した。内因性ピンングは K に比例し、

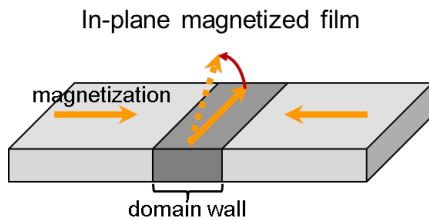


図 1. 面内磁化膜における困難軸方向の磁気異方性を表す模式図。

面内磁化膜における K は図 1 に示すように磁壁内のスピンを膜面垂直方向に起き上がらせるために必要なエネルギーに対応する。したがって、面内磁化膜における K は、界面磁気異方性や結晶磁気異方性などの垂直磁気異方性を用いることにより調整可能である。本研究では、膜厚方向に複雑なスピン構造を形成しないように、膜厚を磁壁幅に対して十分薄くすることが可能な Ta/CoFeB/MgO の界面磁気異方性に着目した。Ta/CoFeB/MgO においては、CoFeB 膜厚を調整することにより磁化容易軸方向を膜面垂直と膜面内方向で制御することができる (S. Ikeda, *et al.*, Nature mater. 9, 721 (2010).). 外因性ピンギがあったとしても、CoFeB 膜厚を精密に制御し、磁気異方性が垂直方向から面内方向に切り替わる境界付近に磁気異方性を調節できれば、外因性ピンギより内因性ピンギの小さい面内磁化膜細線を実現できると考えられる。また、外因性ピンギは磁壁のピンギに関係し、強磁性膜中に欠陥や非磁性不純物を導入し、磁壁のピンギサイトを作製することにより変化させることが可能である。細線幅の縮小とともに、磁壁移動に必要な磁場は増加するため、細線幅を変化させることによっても外因性ピンギの大きさも調整することが可能である。

続いて、面内磁化膜において J_c の内因性ピンギ依存性を調べるための素子作製を行った。内因性ピンギによる J_c は容易軸方向磁場依存性が小さいことが知られているため、 J_c の容易軸方向磁場依存性を調べることにより、内因性ピンギを確認することができる。面内磁化膜細線の場合には形状磁気異方性によって磁化容易軸方向は細線方向となる。そのため、直線状の細線を作製し、その細線内に磁壁を初期配置することが必要となる。これまでに、直線状の面内及び垂直磁化膜細線内に磁壁を初期配置する方法として、細線に磁区生成し易い大面積の強磁性体パッドを接続する方法や電流磁場発生配線を強磁性細線上に配置して電流磁場で磁区を生成する方法などが用いられている。本研究では、素子を設計するため、面内磁化膜に比べて容易に磁壁位置を検出可能な垂直磁化膜を用いてそれらの方法を調べた。

電流誘起磁壁移動を検出する方法としては、異方性磁気抵抗効果を利用する方法が考えられる (M. Kläui *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94, 106601 (2005).). この方法においては、

強磁性細線上に複数の電極を配置する。電極間に磁壁がある場合とない場合で、それらの電極間の抵抗が変化するため、それを利用して磁壁位置を検出可能である。そこで、前述の磁壁初期構造に加えて、磁壁位置検出用の電極を複数備えた素子を作製した。

以上の検討により得られた素子において、 J_c の内因性ピンギ、外因性ピンギ依存性を調べることにより、磁化方向の違いで異なる機構の J_c が観測される原因を明らかにできると期待される。

4. 研究成果

外因性ピンギより内因性ピンギの小さい面内磁化膜細線を実現するため、Ta/CoFeB/MgO 積層膜において、磁気異方性が垂直方向から面内方向に切り替わる条件を調べた。基板側から Ta(3)/Co₂₀Fe₆₀B₂₀(0.9, 1.0, 1.1)/MgO(1.5)/Ta(1) の積層膜を dc マグネトロンスパッタリングで成膜した。ここで括弧内の数字は nm 単位の膜厚である。そして、0.4 T の膜面垂直磁場を印加した状態で 300 °C、1 時間熱処理した。図 1(a)、(b) は振動試料型磁力計を用いて測定した単位面積当たりの磁気モーメント mt の垂直磁場 $\mu_0 H$ 依存性である。図 1(a) は外部磁場範囲 $|\mu_0 H| \leq 2$ T、(b) $|\mu_0 H| \leq 2$ mT の場合である。図 1(a) から CoFeB 膜厚の増加とともに mt の飽和値は増加する。これは、膜厚の増加とともに磁気モーメントが増加することに対応し、膜厚を適切に制御できていることを反映する。図 1(b) から CoFeB 膜厚が 1.1 nm で mt の残留値がほぼゼロとなることがわかる。これは、CoFeB 膜厚の増加とともに垂直磁気異方性が変化し、CoFeB 膜厚 1.0 nm と 1.1 nm の間に、磁気異方性が膜面垂直方向から膜面内方向に変化する境界があることを示唆する。このように CoFeB 膜厚を原子層オーダーの膜厚で制御することにより内因性ピンギの大きさを制御することができる。一方、磁壁移動保磁力は微細化とともに増加するため、同一ウェハ内で CoFeB 層膜厚を変化させた Ta/CoFeB/MgO 積層膜を作製し、かつ細線幅を変えた素子を作製することにより、

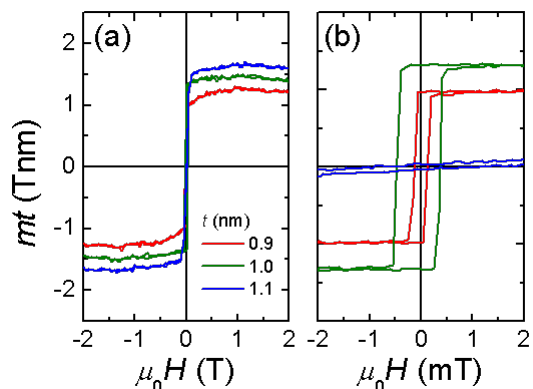


図 2. 単位面積当たりの磁気モーメントの垂直磁場依存性。(a) $|\mu_0 H| \leq 2$ T、(b) $|\mu_0 H| \leq 2$ mT の場合。

ウェハ内で内因性ピニングの強さ、及び外因性ピニングの異なる面内磁化膜細線を作製することができる。

続いて面内磁化膜において J_C の内因性ピニング依存性を調べるための素子について検討を行った。この素子では前述のように直線状の細線を作製し、その細線内に磁壁を初期配置することが必要となる。本研究では、これまでに、直線状の面内及び垂直磁化膜細線内に磁壁を初期配置するために用いられている大面積の強磁性体パッドを細線に接続した構造と強磁性細線上に電流磁場を発生する配線を配置した構造を作製し、それらの特性を調べた。まず、大面積の強磁性体パッドを細線に接続した構造について述べる。スパッタリングで成膜した Ta(3)/Co₂₀Fe₆₀B₂₀(1.0)/MgO(1.5)/Ta(1)を図 3(a)に示すような幅 1 μm の素子に加工した後、0.4 T の膜面垂直磁場を印加した状態で 300、1 時間熱処理した。図 3 (b)、(c)は同一ウェハ上に作製した強磁性パッド無し、有りの素子において、中央のホールプローブで測定したホール抵抗 R_{Hall} の面直磁場依存性である。強磁性パッドを接続することにより、保磁力が減少することから、強磁性パッドから細線内に磁壁を導入可能である。しかし、磁壁移動磁場のおおきあが磁壁導入磁場に近く、細線内に磁壁を初期配置することは困難であった。

次に、電流磁場で磁区生成する構造について述べる。スパッタリングで成膜した Ta(3)/MgO(1.0)/Co₂₀Fe₆₀B₂₀(1.7)/Ta(2)/Ru(1)を図 4(a)に示すような素子に加工した後、0.4 T の膜面垂直磁場を印加した状態で 300、1 時間熱処理した。図 4(b)は電流磁場発生配線に印加した電流値の時間変化であり、図 4(c)は膜表面から膜裏面方向の垂直磁場(負磁場)で飽和させた後、電流磁場発生配線に電

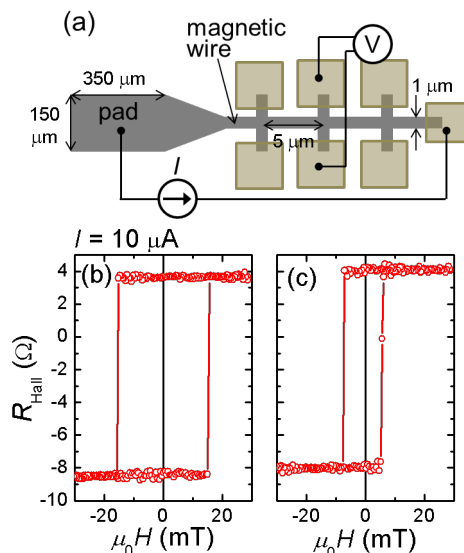


図 3. (a) 強磁性パッドを接続した強磁性細線と測定系の模式図。(b)、(c)は、それぞれ強磁性パッド無し、有りの素子におけるホール抵抗 R_{Hall} の面直磁場依存性。

流を印加し、正磁場を掃引したときの左のホールプローブで測定したホール抵抗の垂直磁場依存性である。電流磁場発生配線に 40 mA 以上の電流を印加すると、磁化反転に必要な磁場が減少していることから、40 mA 以上で電流磁場発生配線付近に磁壁を初期配置できると考えられる。図 5(a)(b)に電流磁場発生配線に 40 mA の電流を印加した場合に電流磁場発生配線付近に発生する電流磁場の計算結果を示す。図 5(a)(b)はそれぞれ、膜面垂直方向の磁場 H_z と膜面内細線方向の磁場 H_x の位置依存性である。図 5(a)より電流磁場発生配線の端付近で $\mu_0 H_z$ は最大値 39 mT をとる。一方、図 4 (c)で電流磁場を発生しない場合に必要な磁場は、46 mT 程度であり、この磁場は磁区生成磁場に対応すると考えられる。電流磁場の膜面垂直方向の磁場が磁区生成磁場よりも小さい原因として、図 5(b)に示す H_x も磁区生成に関係していることが考えられる。面内磁化膜の細線では形状磁気異方性により細線方向が磁化容易軸方向となるため、外部磁場で磁化方向を細線方向にそろえた後、電流磁場を用いることによって磁区生成が可能と考えられる。

これらの知見をもとに面内磁化膜において電流誘起磁壁移動を調べるための素子を試作した(図 6(a))。膜構成は基板側から MgO(1.0)/Co₂₀Fe₆₀B₂₀(1.6)/Ta(2)/Ru(2)である。これまで、ホールプローブとして強磁性体の細線を用いていたが、プローブによる

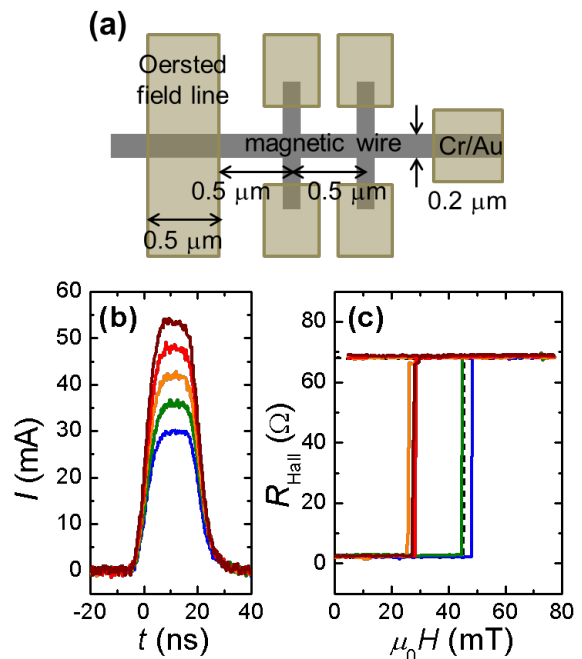


図 4. (a) 電流磁場発生配線付きの強磁性細線の模式図。(b) 電流磁場発生配線に印加した電流値の時間変化。(c)膜表面から膜裏面方向の垂直磁場(負磁場)で飽和させた後、電流磁場発生配線に電流を印加し、正磁場を掃引したときの(a)の左のホールプローブで測定したホール抵抗の垂直磁場依存性。色の違いは(b)で電流磁場発生配線に印加した電流値に対応する。また、破線は電流磁場発生配線に電流を印加しない場合である。

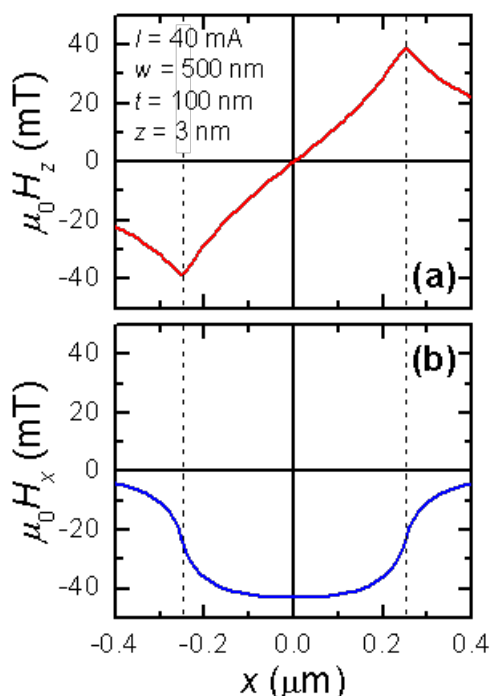


図5. 電流磁場発生配線の周囲に発生する磁場の位置依存性の計算結果。(a)、(b)はそれぞれ膜面垂直方向の磁場 H_z と細線方向の磁場 H_x の場合である。 $x = 0$ は電流磁場発生配線の中央に対応し、 $x < 0$ 、 $x > 0$ はそれぞれ電流磁場発生配線の左側、右側に対応する。

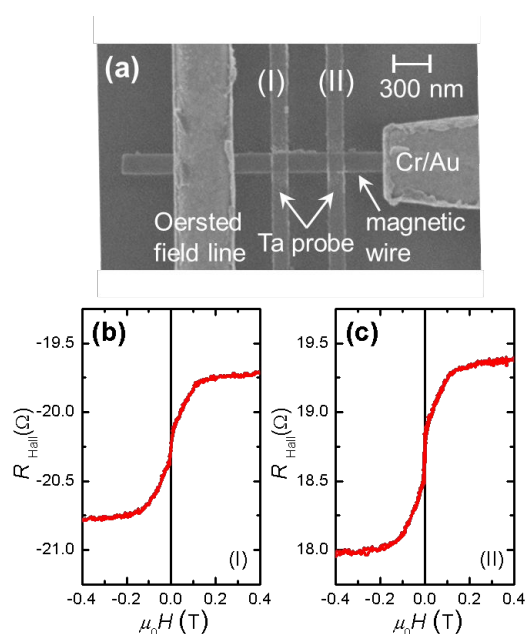


図6. (a) 作製した電流磁場発生配線付きの強磁性細線の走査型電子顕微鏡像。(b)、(c)は(I)、(II)のホールプローブで測定したホール抵抗の垂直磁場依存性。

磁壁のピンングを避けるため、非磁性の Ta でホールプローブを作製した。また、異方性磁気抵抗効果を用いて磁壁位置を検出するため、2 対のプローブを作製した。はじめに異常ホール効果を用いて磁気特性を調べた。図 6(b)(c)にホールプローブ(I)、(II)で測定したホール抵抗の垂直磁場依存性である。明確なヒステリシスを示さないことから、磁化

容易軸方向は膜面垂直方向にはないと考えられる。このように異常ホール効果による磁気特性の検出は可能であったが、異方性磁気抵抗効果による磁壁位置の検出には至らなかった。本研究をもとに、内因性ピンングの強さ、及び外因性ピンングの異なる面内磁化膜細線を作製し、さらに磁壁位置検出方法を確立することにより、 J_C の内因性ピンング、外因性ピンング依存性を調べることが可能となり、磁化方向の違いで異なる機構の J_C が観測される原因を明らかにすることができるかと期待される。

5. 主な発表論文等 なし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山ノ内 路彦 (YAMANOUCHI, MICHHIKO)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40590899