

報道機関各位

配布先：宮城県政記者会  
東北電力記者会

取扱注意：平成 18 年 3 月 1 日午前 11 時解禁  
(独) 科学技術振興機構  
国立大学法人 東北大学

## 電流による磁壁の移動と、磁壁による電気抵抗の発生 メカニズムの解明 (微細磁気素子の磁化状態の新しい制御・検出方法)

JST(理事長 沖村憲樹)と東北大学(総長 吉本高志)の研究チームは、強磁性半導体<sup>(注<sup>1</sup>)</sup>(Ga,Mn)As[ヒ化ガリウムマンガン]に電流を流すことにより、磁壁<sup>(注<sup>2</sup>)</sup>が移動する現象「電流誘起磁壁移動」と、磁壁が電流にとって抵抗になる「磁壁抵抗」の双方を観測し、それらのメカニズムを明らかにしました。

本来磁石であるはずの鉄が、磁石でないように振る舞うときがあるのは、内部にたくさんの磁区(磁石の区切り)が存在していて、それらの磁気が打ち消しあっているからです。その磁区の中では、磁気の方法は揃っていますが、磁区と磁区の境界では磁気の方法が徐々に変化した磁壁と呼ばれる領域ができます。本研究は電流がその磁壁にどのような影響を与えるか、また磁壁が電流にどう作用するかを明らかにしたものです。

本研究では、微細加工により磁壁を所定位置に再現性良く配置し、初めて電流誘起磁壁移動の速度を定量的に解析できる系統的なデータを得ました。その結果、磁壁移動速度は一定の電流値以上で電流の強さに比例的に増加すること、また磁壁の存在により、材料の電気抵抗が大きくなることを観測し、それらのメカニズムも解明しました。

電流により磁壁が移動することを用いた磁気メモリは低消費電力で超高密度化が期待されていますが、移動のメカニズムなどがはっきりしなかったため、メモリ方式や素子構造、素子動作の検討等ができませんでした。今回の研究により、電流による磁壁移動を使ったメモリや論理素子の発展が期待されます。

本成果は、JSTの戦略的創造研究推進事業(ERATO型)大野半導体スピントロニクスプロジェクト(研究総括：大野英男、教授)と東北大学電気通信研究所大野研究室が共同で進めている研究の一環として得られたもので、二つの論文として、米国学術誌「フィジカルレビューレターズ」(オンライン版)に受理され、近日中に公開されます。

なお、上記論文中の磁気光学効果による磁区像の観察、磁気異方性及び異方性磁気抵抗効果の評価に関する部分は、文部科学省の研究開発委託事業「ITプログラム」の一課題である「高機能・超低消費電力メモリの開発」プロジェクト(プロジェクトリーダー：大野英男、東北大学電気通信研究所教授)の成果です。

### < 研究の背景 >

磁石の性質をもつ強磁性体は電子のもつスピが一方向に揃って磁化した領域(磁区)を持っています。強磁性体内に複数の磁区がある際、隣接した磁区同士の境界領域を磁壁と呼びます。磁壁は幅を持ち、その中では、スピンの向きが一つの磁区のスピンの方向から隣接磁区のスピンの向きへと角度を変えながら遷移します。

現在、多くの磁気記憶素子が開発されていますが、これらの素子中の磁化方向(記憶に対応)は外部から磁場を加えることで制御しています。近年、扱われる情報量が増大を続けているため、磁気記憶素子の大容量化が要請されています。そこで磁場を用いた磁化方向制御に代わる電氣的な制御法により、記憶素子の大容量化、低消費電力化、高速化の実現が期待されています。

磁化方向を電氣的に制御する上で、電流を流すことにより磁壁が移動する現象を「電流誘起磁壁移動」と言い、磁壁が電流にとって抵抗になっていることを「磁壁抵抗」と言います。磁壁抵抗については1960年代から、電流誘起磁壁移動については1980年代から盛んに研究が続けられてきましたが、電流と磁壁の相互作用以外の電磁気学的効果が存在するため、実験結果の解釈が困難であり、不明な点が数多く存在していました。

本研究では、既にその性質が理解されている強磁性体である(Ga,Mn)Asから作製された素子において詳細な実験を行うことで、電流により誘起される磁壁移動と磁壁の存在による電気抵抗の増大を観測し、電荷とスピンの担体である伝導電子と磁壁との相互作用がもたらすメカニズムを明らかにしました。本研究結果は電氣的な制御・検出による新しい微細磁気素子開発への礎として役立つものと期待されます。

### < 成果の内容 >

本研究は -V 族化合物半導体 GaAs に磁性元素の Mn をパーセントオーダーで添加した、膜面に垂直方向に磁化容易軸をもつ(Ga,Mn)As 薄膜を用いて研究を行いました。

薄膜表面が平坦な場合、ちょうど氷上に柔らかな壁を置く場合のように、望みの場所に、磁壁を望みの方向に直線状に正確に位置させるのは容易ではありませんが、(Ga,Mn)As 薄膜では、表面を数ナノメートル(1ナノメートルは1メートルの10億分の1)削ることで、表面を削ってない領域と削った領域の境界(段差部)に正確に磁壁を配置することが可能となります(図1)。(英科学雑誌ネイチャー誌に2004年4月掲載)。この磁壁を横切るように電流を流すことで磁壁を移動できることも、その当時に報告しました。今回は、上記研究結果を発展させることで、以下の事を明らかにしました。

- (1) **電流誘起磁壁移動のメカニズムを説明:** 測定には膜厚の異なる2つの領域を有する(Ga,Mn)As 薄膜の段差位置に磁壁を配置した素子を用いました。電流により誘起される磁壁移動の速度を電流密度と温度を変えて詳細に測定しました(図3)。高電流密度領域( $> \sim 3 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>)においては、磁壁移動速度は一定の電流密度以上で電流密度にほぼ比例的に増加し、最高で22 m/sの磁壁移動速度が得られました。この移動速度はギガビット時代のメモリアクセスに十分対応

可能な速度です。理論との比較から、この領域の電流誘起磁壁移動は、図 2 (a), (b)のように、伝導電子のスピンが磁壁を通過した際に磁壁(磁性スピン)に与えられることで生じることを明らかにしました。また、低電流密度領域においては、電流により磁壁のゆっくりとした移動(クリープ)が誘起されることを初めて観測しました。

- (2) **磁壁による電気抵抗のメカニズムを解明**: 表面パターンングにより深さ一定の溝を形成し、溝の段差に磁壁を位置させました。素子幅を変えて磁壁の面積を変えた素子を用いて、磁壁による電気抵抗の測定を行いました。磁壁による電気抵抗の内、電磁気学的効果による電気抵抗は磁壁面積に依存しないのに対して、伝導電子と磁壁との相互作用による電気抵抗は磁壁面積に反比例することを利用して、電磁気学的効果と区別して伝導電子と磁壁との相互作用による電気抵抗を算出しました。その結果、-218 °C の温度での面積あたりの磁壁抵抗は  $\sim 0.5 \mu\text{m}^2$  であることが判りました。定量的に理論計算とこの値を比較することで、上向きと下向きの伝導電子のスピン<sup>(注3)</sup>の混成により抵抗が生じていることを明らかにしました。

以上の結果から、伝導電子と磁壁間の相互作用: 伝導電子が磁壁に及ぼす影響である磁壁移動と、磁壁が伝導電子に及ぼす影響である磁壁抵抗の双方について、初めてメカニズムを明らかにしました。本結果は電流による磁壁制御を用いた微細磁気素子の新しい制御法、検出法の可能性を示すものです。

#### < 今後の展開 >

現在は数ミクロンもしくはそれ以上の大きさの素子を用いて研究を行っています。素子を微細化することで、少ない電流で磁壁移動が可能になり、また磁壁抵抗は大きくなることが期待されます素子サイズ、素子構造を最適化することで、電流誘起磁壁移動と磁壁抵抗が微細磁気記憶素子の情報書き込みと読み出しの新しい手法として適用できるかを探求します。

今回の測定は-160 °C 以下の低温で行いました。強磁性半導体(Ga,Mn)As はその温度以下でしか強磁性体(磁石)にならないからです。より高い温度で磁石になる強磁性半導体の材料開発などの検討を進めることにより、強磁性半導体による超高密度メモリや不揮発性論理素子等、新しいデバイス展開への道を拓くことが期待されます。

#### < 用語解説 >

##### 注 1) 強磁性半導体

強磁性(磁石の性質)を示す半導体。非磁性の半導体(ヒ化ガリウムやヒ化インジウムなど)に磁性をもつ原子(マンガンなど)を高濃度(数%)混入した半導体では、正孔(プラスの電荷をもつキャリア)を介してそれぞれの磁性原子の磁気モーメントが揃い、強磁性を示すようになります。

## 注 2) 磁壁

強磁性体内部で磁化の方向が揃った領域(磁区)の境界。図 4 のように、磁壁の中では、磁気の向きが一つの磁区の磁気方向から隣接磁区の磁気方向へと徐々に角度を変えます。今回実験に用いた(Ga,Mn)As においては、その厚さは 20 nm 程度です。

## 注 3) 伝導電子のスピン

電子は電荷という電気の源となる性質を持っていますが、もうひとつ“スピン”という小さな磁石の性質も持っています。スピンは上向きと下向きの二つの状態を取ります。通常、電流を流したとき、多くの電子が流れています(これを伝導電子と呼んでいます)が、上向きスピンの電子と下向きスピンの電子が同じ割合であるため、全体としてスピンの性質は示しません。しかし、強磁性体などに電流を流すと、磁性体内に流入した多くの伝導電子のスピンは上向き、あるいは下向きどちらかが多い状態に偏るため、スピンの性質を発揮します。この伝導電子が磁壁に流れ込むと、伝導電子と磁壁間の相互作用を生じさせます。

## < 論文名 >

1. M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura, T. Dietl, and H. Ohno, “Velocity of domain-wall motion induced by electrical current in the ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As”, Physical Review Letters.  
(強磁性半導体(Ga,Mn)As における電流誘起磁壁移動速度)
2. D. Chiba, M. Yamanouchi, F. Matsukura, T. Dietl, and H. Ohno, “Domain-wall resistance in ferromagnetic (Ga,Mn)As”, Physical Review Letters.  
(強磁性(Ga,Mn)As における磁壁抵抗)

## < 研究領域 >

戦略的創造研究推進事業 (ERATO 型)「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」  
(研究期間 平成 14 年 11 月 ~ 平成 20 年 3 月)

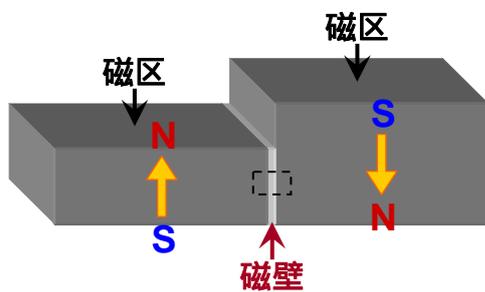


図1 (Ga,Mn)As 表面パターンニングした構造においては、段差を境として2つの磁化方向が揃った領域(磁区)を配置可能です。磁壁面積を変化させて電気抵抗値を測定することにより、電磁気学的効果と区別して磁壁抵抗を算出できます。

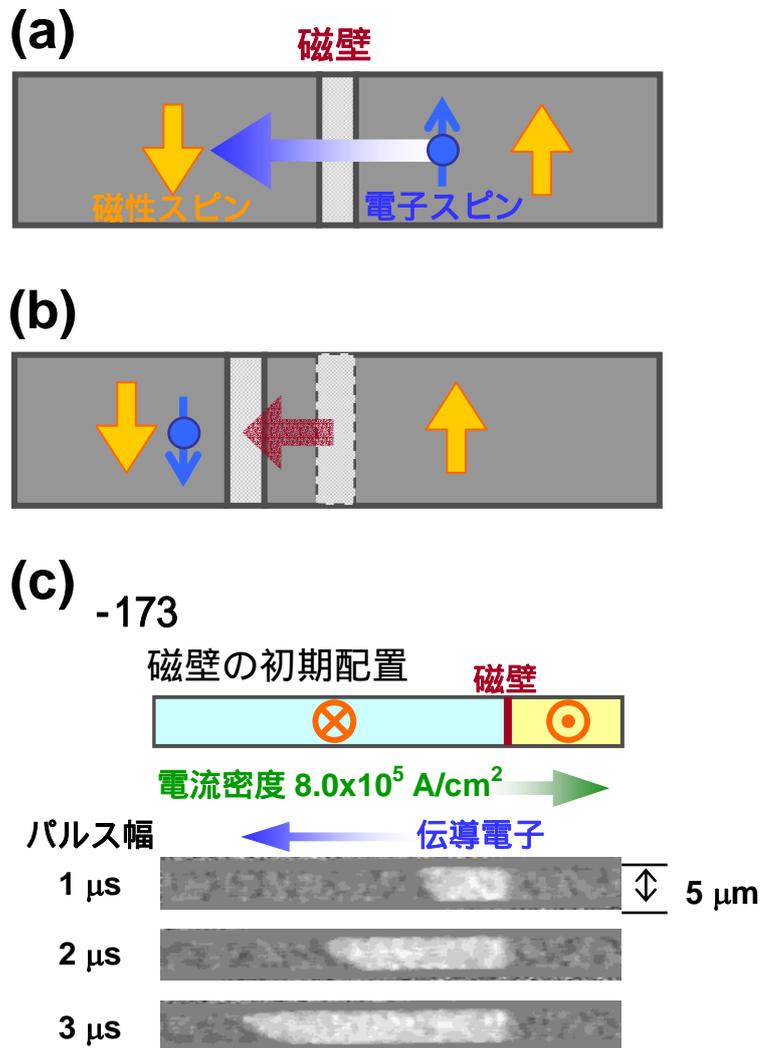


図2 上向き電子スピンの磁壁を通過する場合があります(a)。磁壁を通過した電子スピンは下向きに変化します。磁壁を通過した際に電子スピンの失ったスピンは磁壁に与えられて、磁壁が移動します(b)。-173 において図のように磁壁を初期配置した後、右方向に電流密度  $8.0 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 、パルス幅 1, 2, 3  $\mu\text{s}$  の電流パルスを加えた後の磁気光学カー効果偏光顕微鏡による磁区の像(c)。図の明るい領域は磁壁が移動して磁化反転した領域を表します。伝導電子はスピンを運んで、電流と反対方向に磁壁を通過するので、磁壁は左方向に移動します。

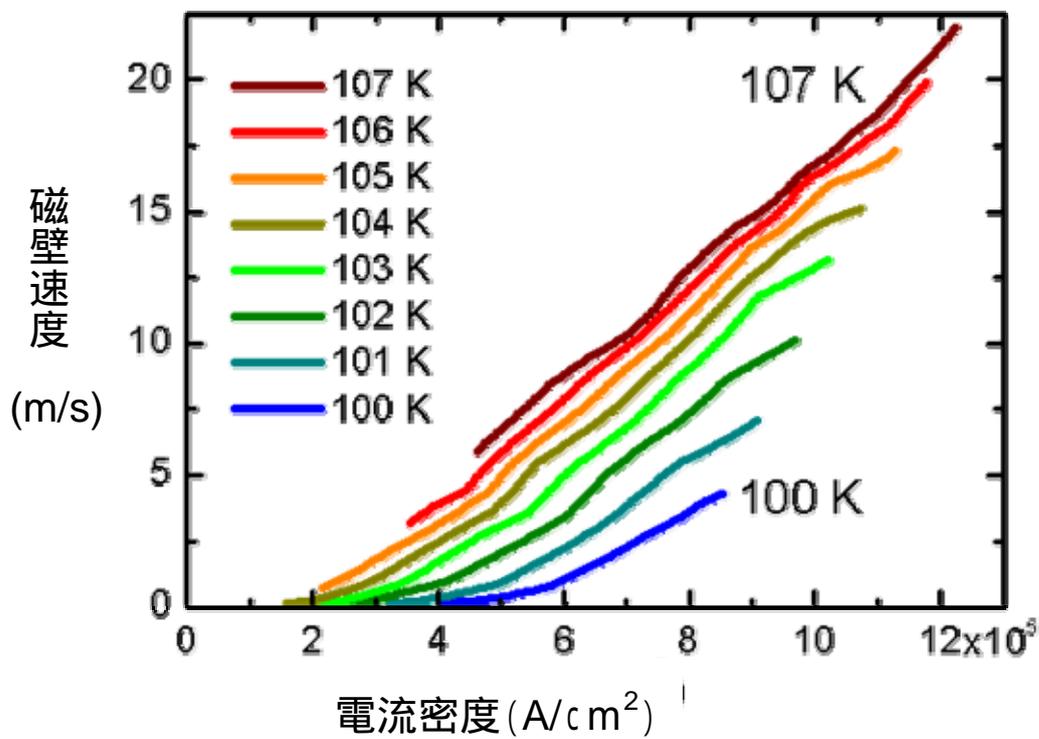


図3 磁壁に電流を流したとき、電流密度に対して磁壁速度が変化の様子。  
 ~  $3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  以上の電流密度で磁壁速度は比例的に増加しています。  
 測定温度は 100K ( -173 ) から 107K ( -166 ) までの範囲で変えて測定しています。

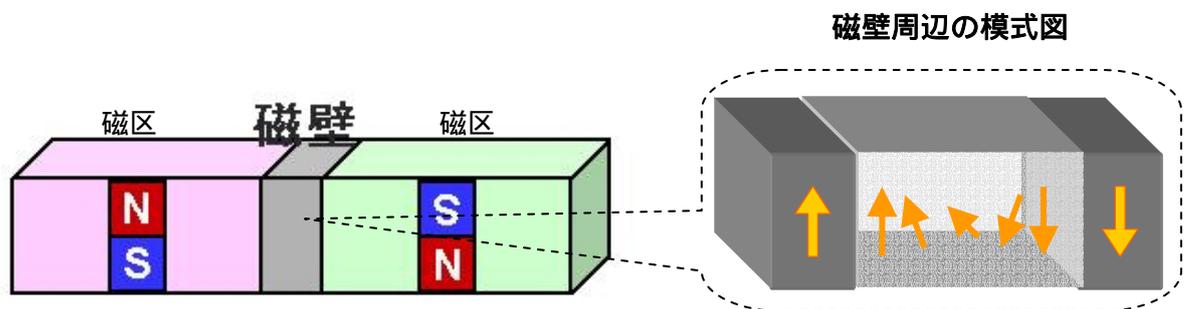


図 4 磁区と磁区の境界は磁壁と呼ばれ、磁壁内では、磁気方向が一つの磁区の磁気方向から隣接する磁区の磁気方向へと徐々に変化しています。

<お問い合わせ先>

松倉 文礼(まつくら ふみひろ)

東北大学 電気通信研究所 附属ナノ・スピン実験施設

郵便番号〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

TEL, FAX: 022-217-5555

E-mail: f-matsu@riec.tohoku.ac.jp

松寺 久雄(まつてら ひさお)

科学技術振興機構 大野半導体スピントロニクスプロジェクト

郵便番号〒980-0023 仙台市青葉区北目町 1-18 ピースビル北目町 5F

Tel: 022-224-5101 Fax: 022-224-5102

E-mail: matutera@spin.jst.go.jp

星 潤一(ほし じゅんいち)

科学技術振興機構 戦略的創造事業部

特別プロジェクト推進室

郵便番号〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

TEL: 048-226-5623 FAX:048-226-5703

E-mail: hoshi@jst.go.jp