



東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター (CSIS)
 東北大学 電気通信研究所 (RIEC)
 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)

ナノ秒電流パルスによる磁壁の高い制御性を実証
 —高速・高信頼スピントロニクス論理集積回路の実用化に前進—

【研究概要】

東北大学省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター (CSIS) の深見俊助教、大野英男センター長 (同大学電気通信研究所・教授、原子分子材料科学高等研究機構・主任研究者兼任) らは、強磁性細線中の磁壁をナノ秒電流パルスにより極めて高い確率で制御できることを実証しました。

現在の集積回路では電子の電気的性質が利用されていますが、電子の持つ磁氣的性質 (スピン) も積極的に利用することで消費電力の劇的な低減が可能となります。これはスピントロニクス論理集積回路といわれ、非常に注目されています。スピントロニクス論理集積回路を実現する有望な技術の一つとして、強磁性細線中の磁壁を電流によって駆動する「電流誘起磁壁移動」があります。この技術を実用化するためには、従来の集積回路技術と遜色のない高速・高信頼性を有している必要がありますが、これらについて今まで十分な研究はなされていませんでした。

今回深見助教らは、強磁性細線中にパルス電流を導入したときに、ピン止めされていた磁壁が脱出する確率を測定し、応用上非常に好ましい二つの性質を明らかにしました。その一つ目は磁壁が脱出するのに必要な電流密度がパルス電流の幅を2ナノ秒程度まで短くしても変わらないことであり、これは電流誘起磁壁移動が高速性という観点で十分な特性を有していることを意味します。二つ目は脱出の失敗確率があるしきい値以上において電流密度の増大とともに急激に減少することであり、これは動作信頼性という観点での高いポテンシャルを意味しています。またここで得られた実験結果は熱揺らぎの影響を取り入れた理論計算で再現されることが確認されました。このことは今回用いた理論モデルが今後の材料・素子開発において有用であることを示しています。

本研究により、電流誘起磁壁移動を利用したスピントロニクス論理集積回路では消費電力を劇的に低減できるだけでなく、従来の半導体集積回路技術と同等の高速・高信頼性も実現できることが分かりました。これによってスピントロニクス論理集積回路の実用化がより一層現実的なものになりました。

本研究は、日本学術振興会・最先端研究開発支援プログラム「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」の支援の下で行われました。本研究成果は、英国科学誌「Nature Communications (ネイチャー・コミュニケーションズ)」のオンライン版 (8月15日付: 英国時間) に掲載されました。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター 助教 深見俊輔 TEL: 022-217-5555

(報道担当)

東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター 支援室長 門脇豊 TEL: 022-217-6116

【研究の背景】

半導体技術を利用した論理集積回路はスマートフォンや自動車などの頭脳として幅広く用いられています。現在の論理集積回路は電子の電氣的性質を利用して成り立っていますが、電子には磁気（スピン）という顔もあります。これらの二つの性質を上手く融合したものがスピントロニクス論理集積回路であり、システムの消費電力を1/100にまで低減できることから、大変注目されています^(注1)。

スピントロニクス論理集積回路の核となる技術として、ナノメートルサイズの磁性体の磁気構造を電流によって操作する電流誘起磁化反転が挙げられます。強磁性細線中の磁壁^(注2)を電流によって駆動する「電流誘起磁壁移動」^(注3)はその一技術であり、既存の半導体集積回路との互換性に優れていることが分かっています。すなわち、電流誘起磁壁移動を利用した記憶素子をスピントロニクス論理集積回路に適用することで、身の回りの多くのデジタル機器の消費電力を劇的に低減できることが期待されます。

ところで電流誘起磁壁移動を利用した集積回路を実現するためには、従来の半導体技術と同様にナノ秒領域においてエラーなく動作することが不可欠となります。これまでの電流誘起磁壁移動に関する研究ではこうしたナノ秒領域での磁壁の確率的な振る舞いについては十分に調べられていませんでした。

【研究の内容】

図1は本研究で用いた試料の構造と実験の方法を模式的に表しています。Co/Ni 積層膜^(注4)を十字形状の細線に加工すると、その部分が磁壁のピン止め場所になります。このような磁壁を有する細線に電流パルスを繰り返し導入し、磁壁の脱出確率を測定しました。

図2(a)には測定された磁壁の脱出確率が電流パルスのパルス幅と振幅（電流密度）に対して示されています。図からわかるように、パルス幅を2ナノ秒程度まで短くしても、磁壁の脱出に必要な電流密度は増大していません。この2ナノ秒という時間は従来の半導体ベースの集積回路と同等の書き換え動作速度を実現する上で十分に短いことから、電流誘起磁壁移動は高速性という点で十分な特性を有していると言えます。次に図3(a)にはパルス幅は2ナノ秒で固定し、電流密度の大きさに対して磁壁の脱出の失敗確率（エラーレート）を測定した結果が示されています。エラーレートはあるしきい値以上において電流密度の増加とともに急激に減少しています。これは電流誘起磁壁移動を利用した素子の書き換え誤動作確率を極めて低く抑えられ、信頼性の高い記憶素子を実現できることを意味しています。

また得られた実験結果は、熱揺らぎ^(注5)の影響を考慮した理論計算によって良好に再現されることが確認されました。図2(b)、図3(b)にはそれぞれ図2(a)、図3(a)の実験結果に対応した計算結果が示されています。どちらの計算結果も実験結果と良い精度で一致していることが分かります。このことから、ここで用いられた計算方法は磁壁の確率的な振る舞いを正確にモデル化できていると考えられ、今後の材料・素子開発の重要なツールとなることが期待されます。

【研究の意義】

本研究によって、電流誘起磁壁移動を利用した記憶素子をスピントロニクス論理集積回路に適用することで、低消費電力という価値を提供しながら、同時に既存の半導体集積回路の持つ高速・高信頼動作という特長は維持できることが明らかになりました。これによって、スピントロニクス論理集積回路の実現に向けて大きく前進したと考えられます。

【参考図】

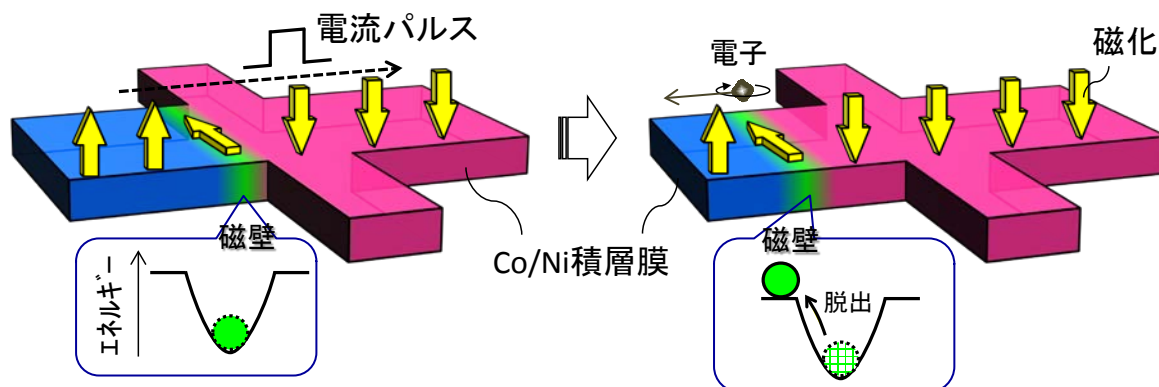


図1 本研究で用いた試料と実験内容の模式図。十字形状に加工された Co/Ni 積層膜からなる細線中にピン止めされた磁壁に対して電流パルスを導入しました [左図]。電流パルスの幅と振幅（電流密度）が十分大きいとき、伝導電子によって磁壁はピン止め位置から脱出することができます [右図]。

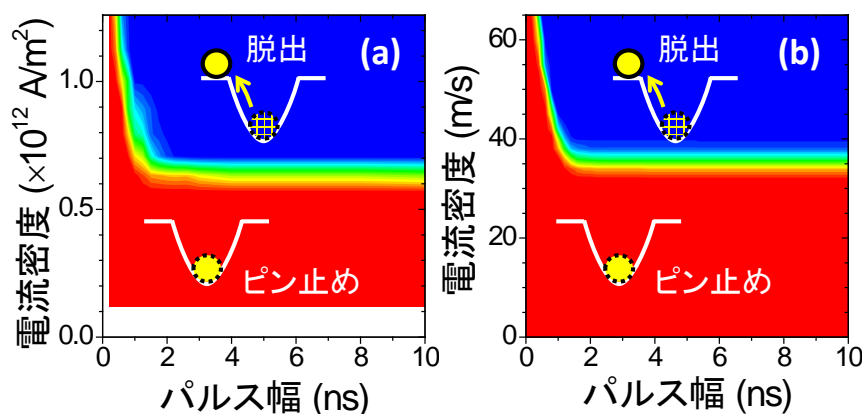


図2 磁壁の脱出確率のパルス幅、電流密度依存性。(a) 実験結果、(b) 計算結果。パルス幅が約 2 ns 以上のとき、脱出に必要な電流密度のしきい値は一定となっています。また計算結果と実験結果が良い一致を示している点も重要です。

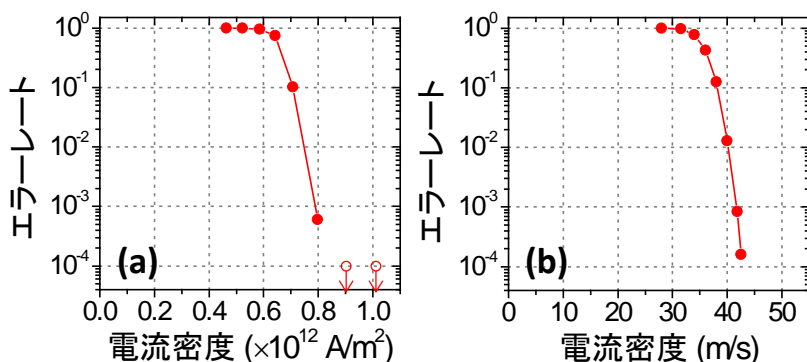


図3 磁壁の脱出の失敗確率（エラーレート）の電流密度依存性。(a) 実験結果、(b) 計算結果。パルス幅は 2 ns。あるしきい値以上の電流密度において、エラーレートは急激に減少していることが分かります。なお実験においては $8.5 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ 以上の電流密度では 10000 回の測定でエラーは観測されませんでした。加えて、ここでも計算と実験は良い一致を示しています。

【用語解説】

(注1) スピントロニクス論理集積回路

電子の持つ電氣的性質（電荷）と磁氣的性質（スピン）の両方を利用した論理集積回路を指します。蓄積された電荷は電源が遮断されると消失しますがスピンは保持されるので、非動作時（待機時）の電力供給が不要となります。東北大学省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター (<http://www.csis.tohoku.ac.jp/japanese/>) ではスピントロニクス論理集積回路を実現するための材料・素子・プロセス・回路技術を研究しており、「文字検索処理にかかる消費電力を 1/100 に削減する検索用論理集積回路の基本動作の実証」などに成功しています。

(注2) 磁壁

磁石のもつ磁氣的性質は電子のもつスピンに由来しています。磁石の内部をミクロに見ると、このスピンの揃った領域があり、これを磁区と言います。また異なる回転方向のスピンを有する磁区と磁区の境界領域を磁壁と言います。（図 1 参照）

(注3) 電流誘起磁壁移動

上記の磁壁を貫通する方向に電流を導入したとき、磁壁が電流と逆方向（電子の方向）に移動する現象のことです。1978年に理論的に予言され、2004年に単一の磁壁の電流誘起磁壁移動が世界で初めて実験的に示されました。

(注4) Co/Ni 積層膜

コバルト (Co) とニッケル (Ni) を数原子層周期で交互に積み重ねた薄膜です。通常の磁性薄膜では、その磁化は膜面内方向を向きますが、Co/Ni 積層膜においては磁化が膜面垂直方向を向く（垂直磁気異方性がある）ことが知られています。また Co/Ni 積層膜は近年の研究から制御性の高い電流誘起磁壁移動を実現する有望な材料であることもわかってきました。

(注5) 熱揺らぎ

絶対零度 (-273°C) においては電子、原子、分子などあらゆるものが凍りついた状態にありますが、有限の温度では熱の効果で多少なりとも運動しており、これを熱揺らぎと言います。ブラウン運動（溶媒中の微粒子が不規則に運動する現象）は熱揺らぎによるものであることがアインシュタインによって明らかにされました。本研究においては、このアインシュタインの熱揺らぎの取り扱い方を磁壁の運動の揺らぎに適用し、実験で得られた確率的な振る舞いをモデル化しました。

【論文情報】

S. Fukami, M. Yamanouchi, S. Ikeda, and H. Ohno, “Depinning probability of a magnetic domain wall motion in nanowire by spin-polarized currents,” *Nature Communications*, doi: 10.1038/ncomms3293 (2013).

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター (CSIS) 助教

深見 俊輔 (フカミ シュンスケ)

Tel: 022-217-5555

E-mail: s-fukami@csis.tohoku.ac.jp

<報道担当>

東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター (CSIS) 支援室長

門脇 豊 (カドワキ ユタカ)

Tel: 022-217-6116

E-mail: sien@csis.tohoku.ac.jp