

垂直磁化型磁壁移動メモリ用磁性細線の磁壁電流駆動観察

ルネサス エレクトロニクス株式会社
デバイス・解析技術統括部
メモリ混載デバイス開発部

谷川 博信

2013/03/11
先端磁性材料研究会(第6回)

共同研究者

**ルネサスエレクトロニクス：
大嶋則和**

**SPring-8：
大河内拓雄、小嗣真人、木下豊彦**

**京都大学：
小山知弘、吉村瑤子、千葉大地、小野輝男**

<謝辞>

本研究は2009B, 2010A期重点産業利用課題および2011A, 2011B, 2012A, 2012B期重点グリーン／ライフ・イノベーション推進課題で実施されました。

outline

■ MRAM開発

- ◆MRAMの特徴
- ◆電流による磁化制御
- ◆磁壁移動型MRAM

■ 磁壁電流駆動現象

- ◆磁壁電流駆動現象の説明
- ◆低電流化を目的とした材料探索
- ◆垂直磁化材料Co/Niの実験結果

■ 放射光による磁壁移動観察

- ◆Co/Ni素子:ex-situ実験
- ◆Co/Ni素子:in-situ実験
- ◆CoFeB素子:ex-situ実験
- ◆現状の課題と今後の展開

■ まとめ

outline

■ MRAM開発

- ◆MRAMの特徴
- ◆電流による磁化制御
- ◆磁壁移動型MRAM

■ 磁壁電流駆動現象

- ◆磁壁電流駆動現象の説明
- ◆低電流化を目的とした材料探索
- ◆垂直磁化材料Co/Niの実験結果

■ 放射光による磁壁移動観察

- ◆Co/Ni素子:ex-situ実験
- ◆Co/Ni素子:in-situ実験
- ◆CoFeB素子:ex-situ実験
- ◆現状の課題と今後の展開

■ まとめ

MRAMの基本的な特徴

MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory
磁化の方向を記録情報とし、磁気抵抗効果で読み出すメモリ

- **不揮発** (non-volatile)
磁化方向は維持される → 電力OFFしてもデータが残る。
- **高速動作** (high speed operation)
磁化反転は **ナノ秒オーダー** で起こる高速現象。100MHz~GHzの動作
- **繰り返し耐性** (endurance)
磁化方向を何度変えても劣化しない。
- **低消費電力** (low power)
記録パルスが短いので電力としては小さい。データ保持のためのリフレッシュ不要

⇒ 素子の微細化に伴い、書き込み技術が磁場書き込みから電流書き込みへ

電流による情報書き込み

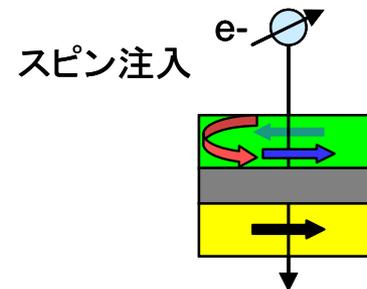
✓ スピン注入磁化反転

磁性体に電流を通じ、電子スピンとの相互作用で磁化回転

素子微細化で記録電流低減

→ 高密度化に有利

Spin-RAMとして各所で開発が進み、実用化に目途



✓ 磁壁電流駆動

微小磁性体内の磁壁を行き来させることで磁化を反転

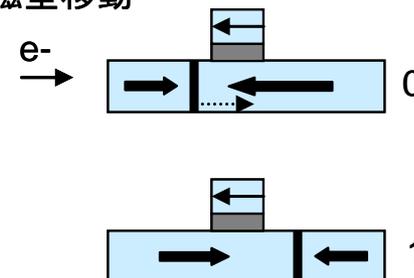
素子が小さいほど記録電流が低減し、反転時間短縮

→ 微細化、高速化に有利

磁壁移動型メモリとしてNEC/Renesasで研究開発

磁化反転の決定因子: 電流密度 → 微細ほど低電流

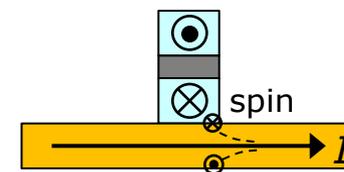
磁壁移動



✓ スピンホールトルク [L. Liu et. al., Science 336, 555 (2012)]

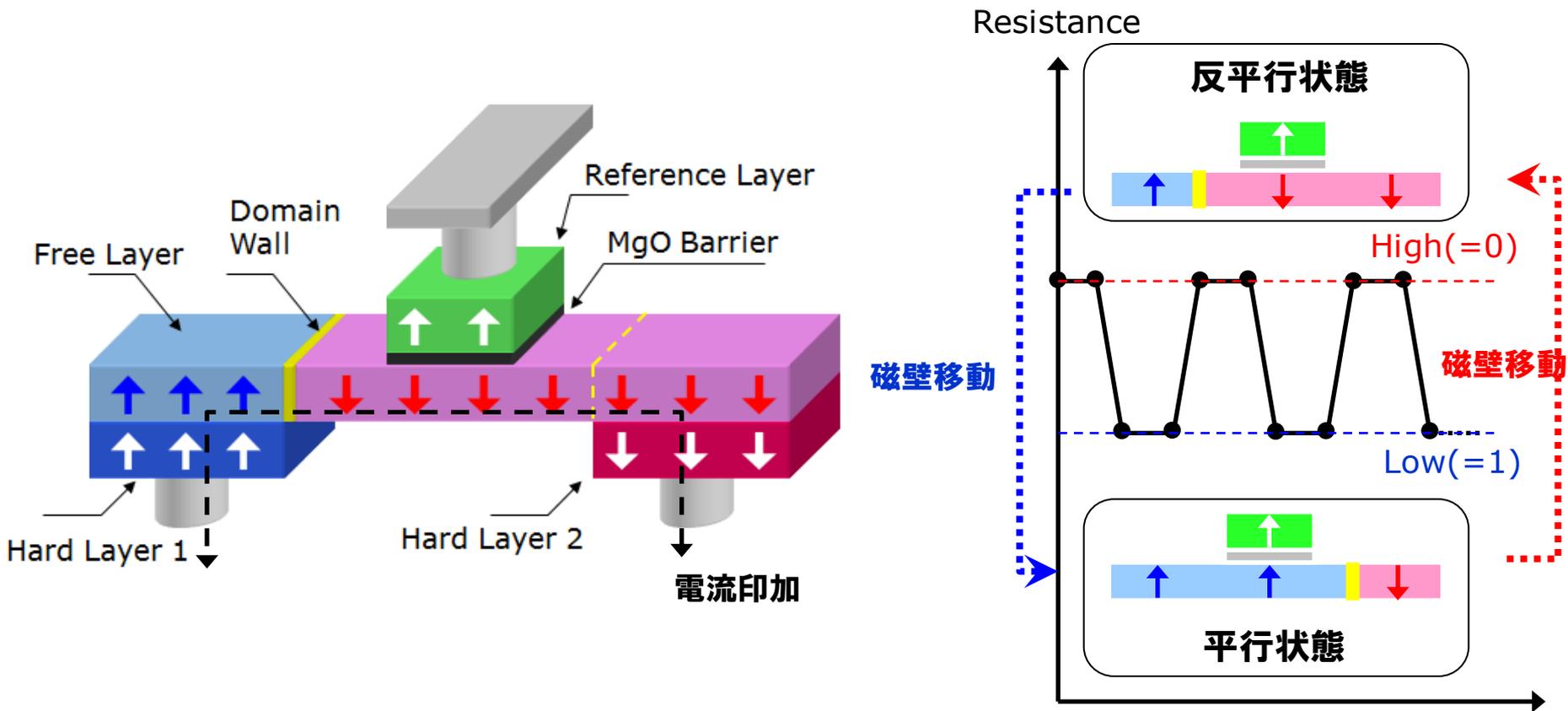
非磁性体からのスピンホールトルクによって磁化反転

将来的に3端子素子に 응용可能



磁壁移動型MRAM素子

磁壁電流駆動による磁化反転方式で実現され得る素子構造 : 3端子素子



電流による磁壁動作によって磁化の制御を行い、MTJの高/低抵抗状態を実現することで、メモリ動作が可能となる。

outline

■ MRAM開発

- ◆MRAMの特徴
- ◆電流による磁化制御
- ◆磁壁移動型MRAM

■ 磁壁電流駆動現象

- ◆磁壁電流駆動現象の説明
- ◆低電流化を目的とした材料探索
- ◆垂直磁化材料Co/Niの実験結果

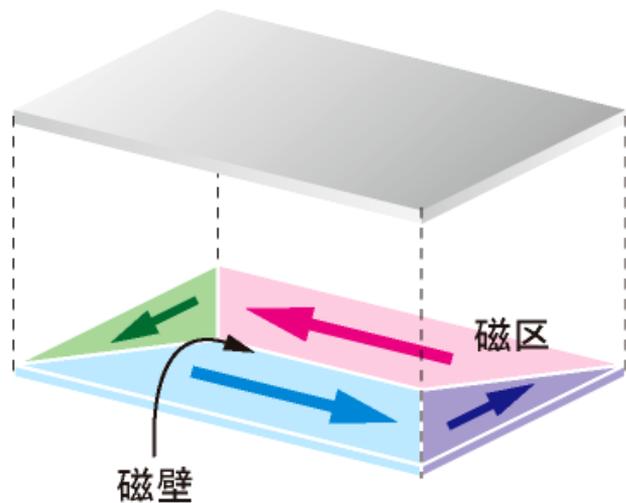
■ 放射光による磁壁移動観察

- ◆Co/Ni素子:ex-situ実験
- ◆Co/Ni素子:in-situ実験
- ◆CoFeB素子:ex-situ実験
- ◆現状の課題と今後の展開

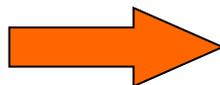
■ まとめ

磁性細線中の単一磁壁

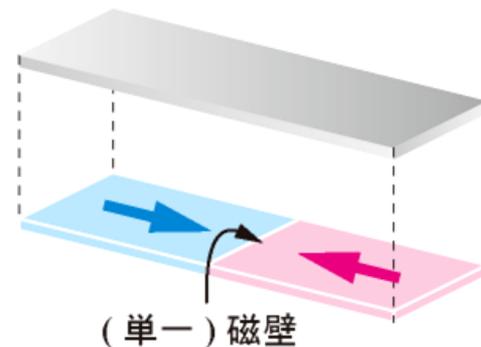
強磁性薄膜(> 数10 μm)



微細化



強磁性細線(幅~数100 nm)



▼ 薄膜を磁区幅以下に微細加工することによって、単一磁壁の導入が可能。

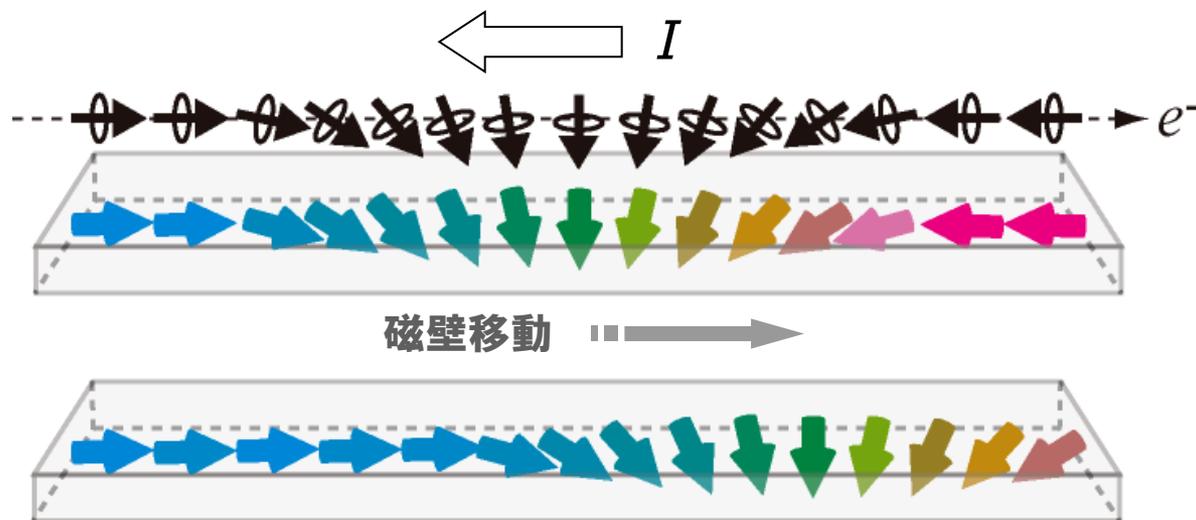
磁壁... 磁区と磁区との境界で、磁化方向が連続的に変化している領域。



単一磁壁の電流駆動現象

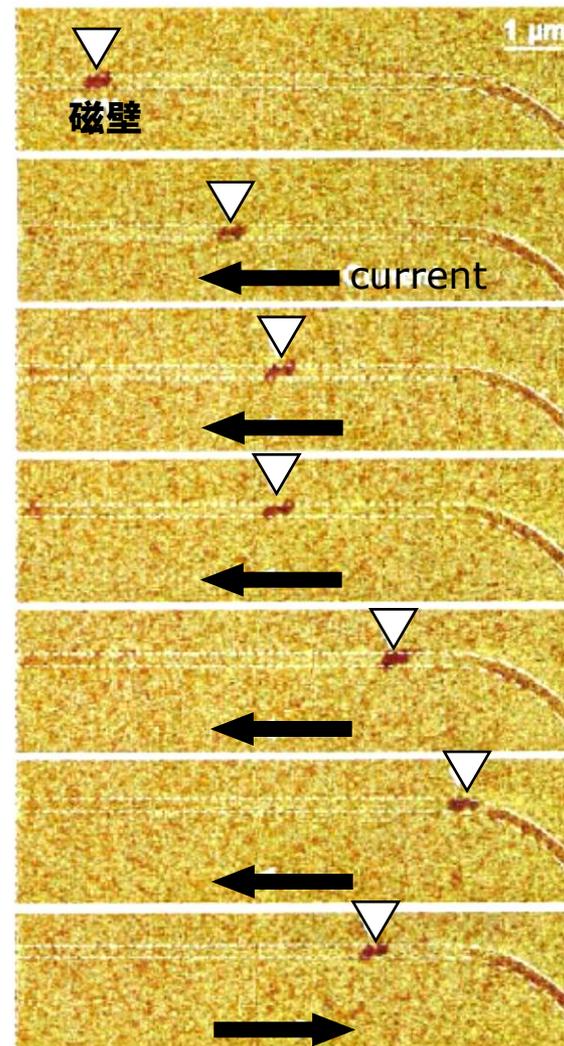
強磁性体に電流を印加すると、電子が磁壁を通り抜ける前後で、角運動量に変化する。角運動量保存則から、スピンに角運動量が受け渡されて磁壁を移動させる力(=スピントルク)になり、電流と逆方向に磁壁が移動する。

⇒スピントランスファー効果



▼磁壁移動型MRAMの書き込み技術に応用可能。

▼MFMによる磁壁移動の直接観察



A.Yamaguchi, et. al., Phys. Rev. Lett. **92**, 077205 (2004).

磁壁電流駆動のメカニズム

スピントルクを含むLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)運動方程式

$$\frac{dm}{dt} = -|\gamma| m \times H_{eff} + \alpha m \times \frac{dm}{dt} - \frac{g\mu_B J P}{2eM_S} \frac{\partial m}{\partial y}$$

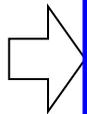
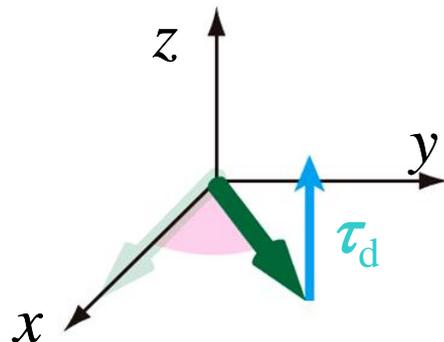
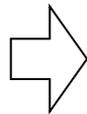
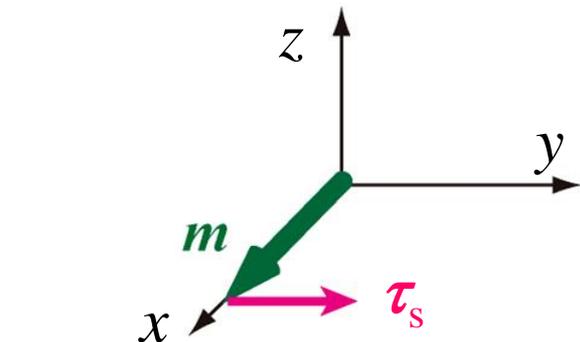
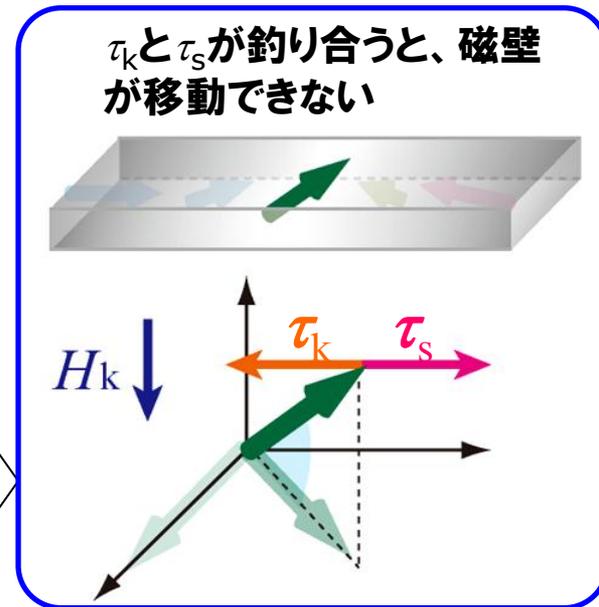
磁化の運動

反磁界項 τ_k

ダンピング τ_d

スピントルク τ_s

- g : ジャイロ磁気定数
- α : Gilbert damping
- J : 電流密度
- P : 分極率



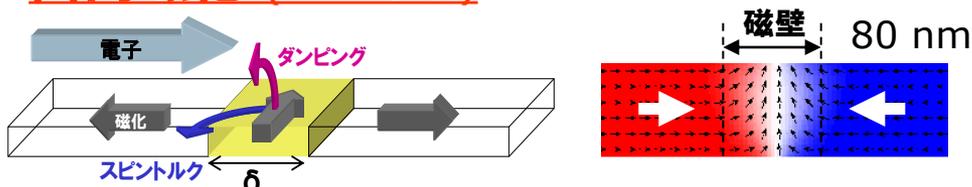
▼磁壁移動のためには、反磁界の限界値 ($H_K^{MAX} \rightarrow \tau_k$) に打ち勝つスピントルクが必要

⇒ しきい電流密度 J_{th} が存在する

磁壁移動メモリの材料検討

▼面内磁化と垂直磁化の比較

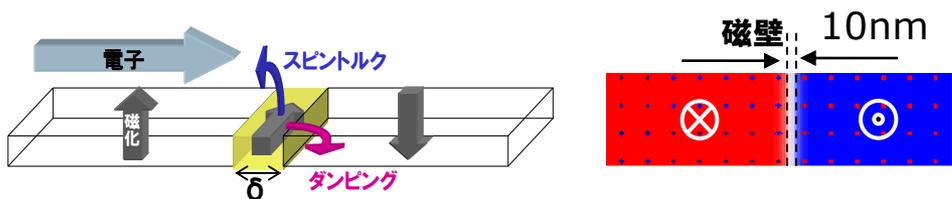
面内磁化 (NiFeなど)



スピントルクの磁壁駆動効率：低い

➡ **低電流駆動に不利**

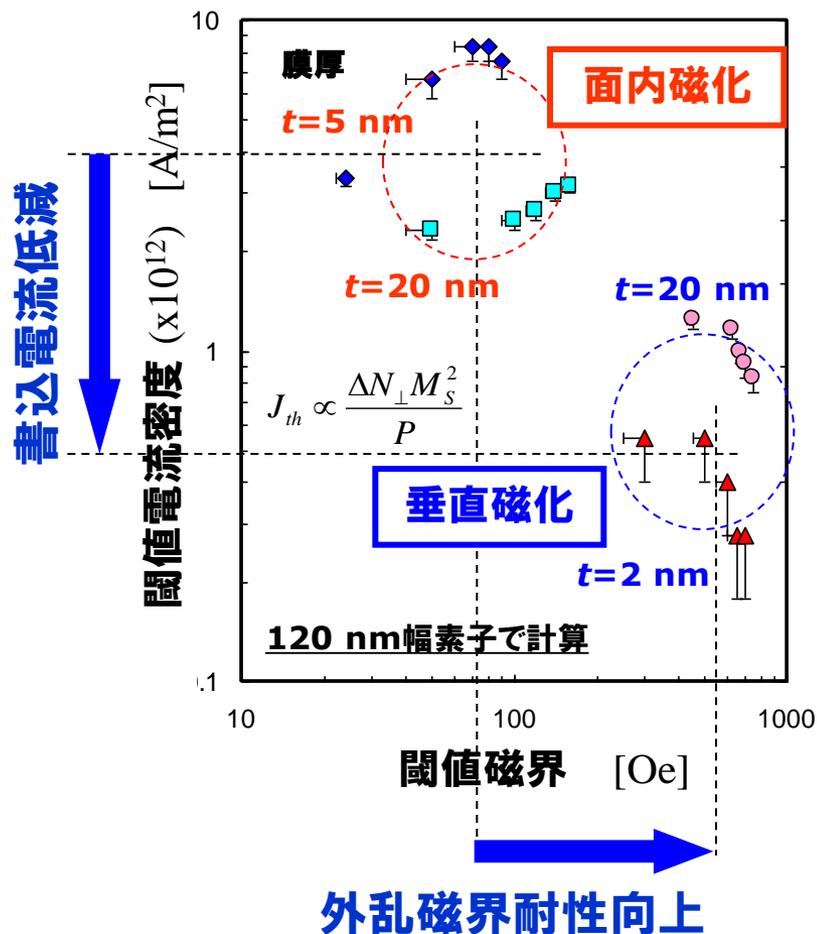
垂直磁化 (Co/Pt, CoPt, Co/Niなど)



スピントルクの磁壁駆動効率：高い

➡ **低電流駆動に有利**

▼計算結果からの比較

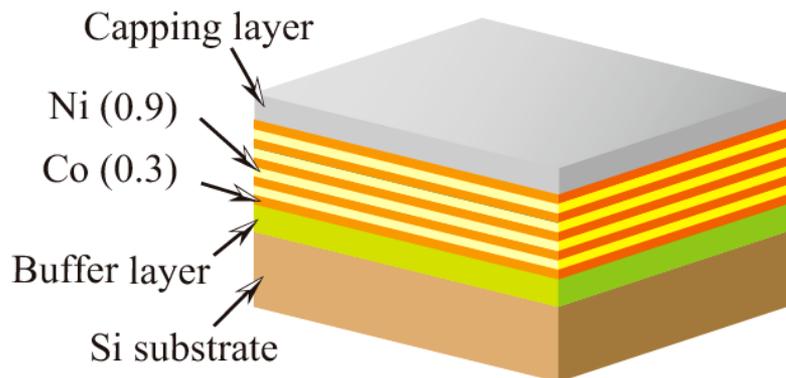


垂直磁化型は面内磁化型に対し、

- 書込み電流低減
- 外乱磁界安定性向上

垂直磁化Co/Ni積層膜の磁気特性

膜構成 : Ta(3)/Pt(1.5)/Co(0.3)/[Ni(0.9)/Co(0.3)]_{N=4}/Pt(1.5)/Ta(3)/Si Substrate



<連続膜の諸特性>

▼保磁力 $H_C = 100$ Oe

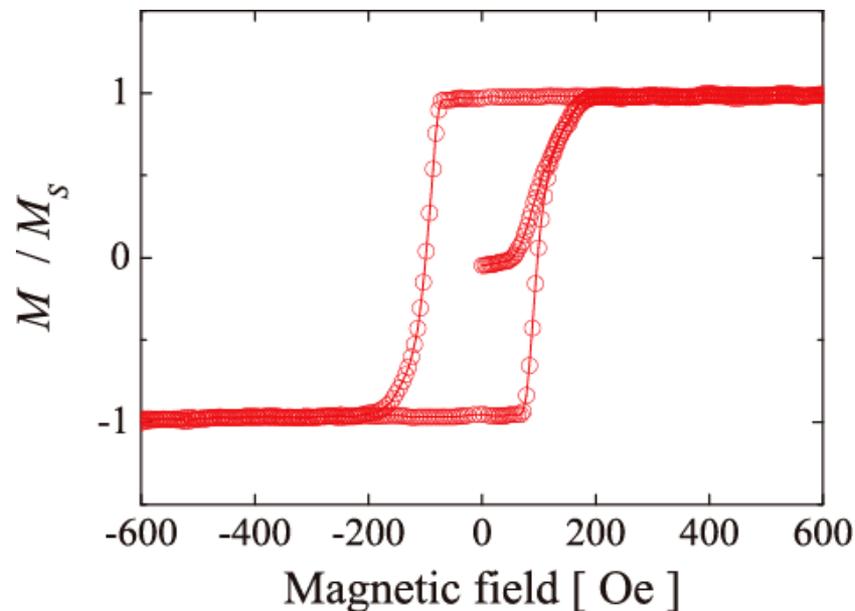
▼飽和磁化 $M_S = 6.8 \times 10^5$ A/m

▼一軸異方性定数 $K_u = 3.8 \times 10^5$ J/m³

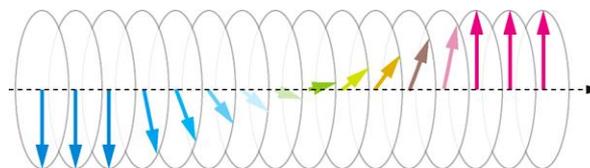
▼異方性磁界 $H_S \sim 2500$ Oe

磁壁幅 $\Delta = \pi \sqrt{\frac{A}{K_u}} = 16$ nm

▼基板垂直方向の磁化測定



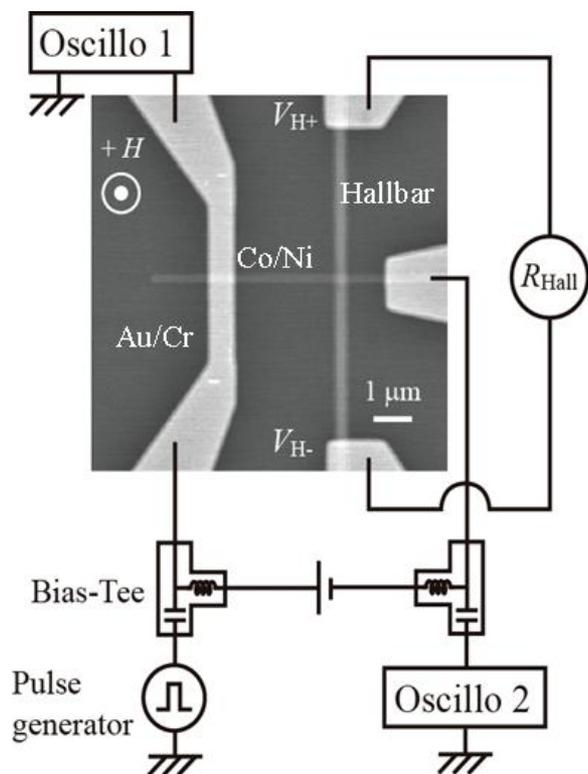
▼磁壁構造 : Bloch磁壁*



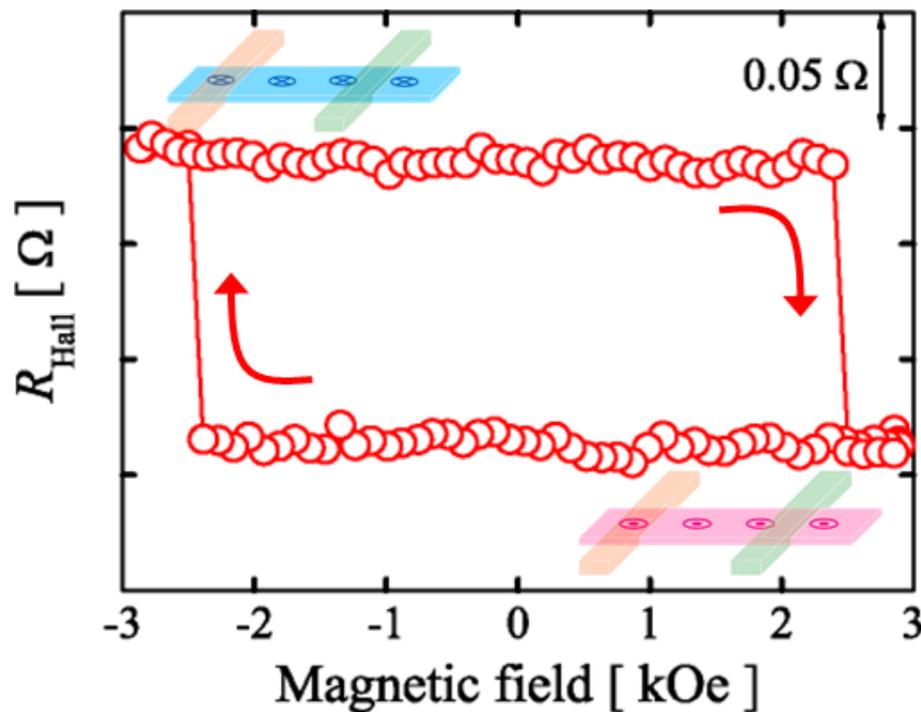
* A. D. Kent, et. al., J. Phys.:Condens. Matter. **13**, R461 (2001).

磁壁電流駆動測定の素子

H. Tanigawa, *et. al.*, Appl. Phys. Express **2**, 053002 (2009).



▼Hall抵抗測定

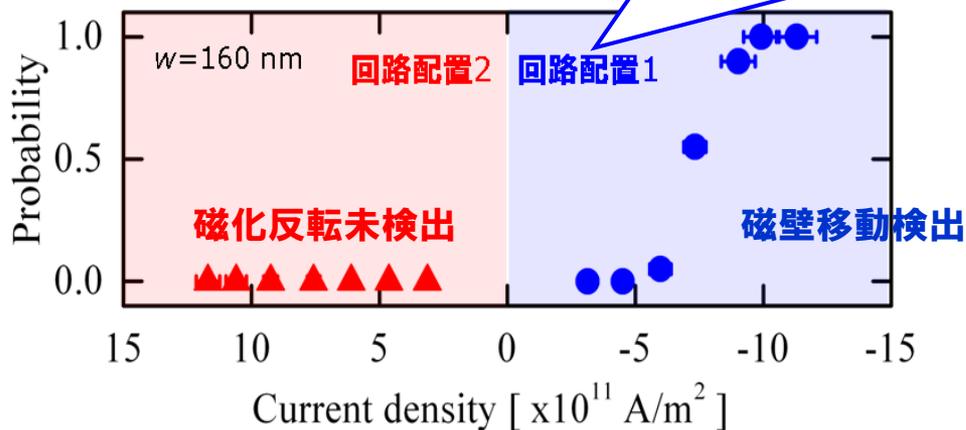
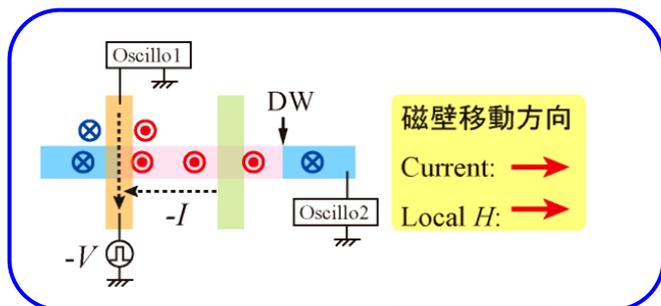


▼局所磁場による磁壁導入

▼異常Hall効果による電気的な磁壁移動検出

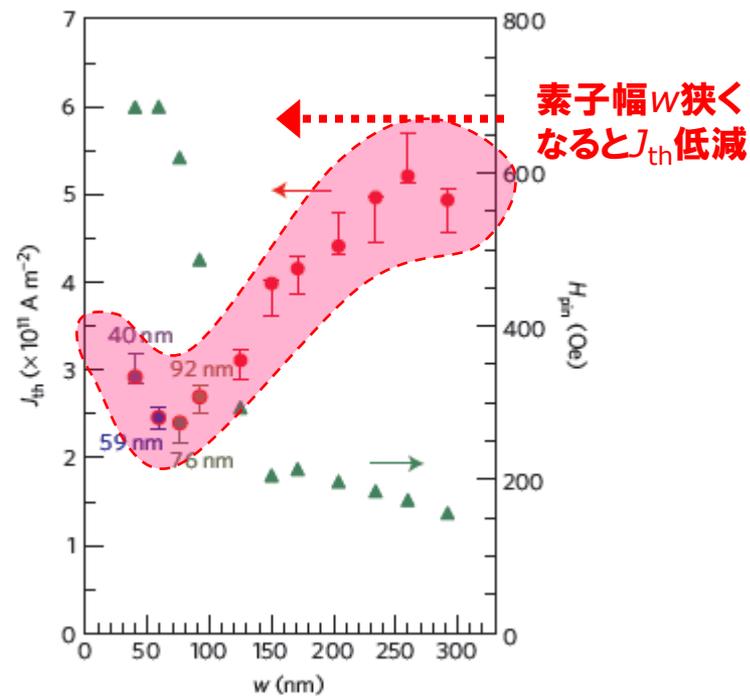
Co/Ni細線中の磁壁電流駆動

▼磁壁移動の電流方向依存性



▼しきい電流密度の素子幅依存性

T. Koyama, et al., Nature mat. **10**, 194 (2011).



▼電流方向と逆方向に磁壁移動 ⇒ スピントランスファートルクによる磁壁電流駆動。

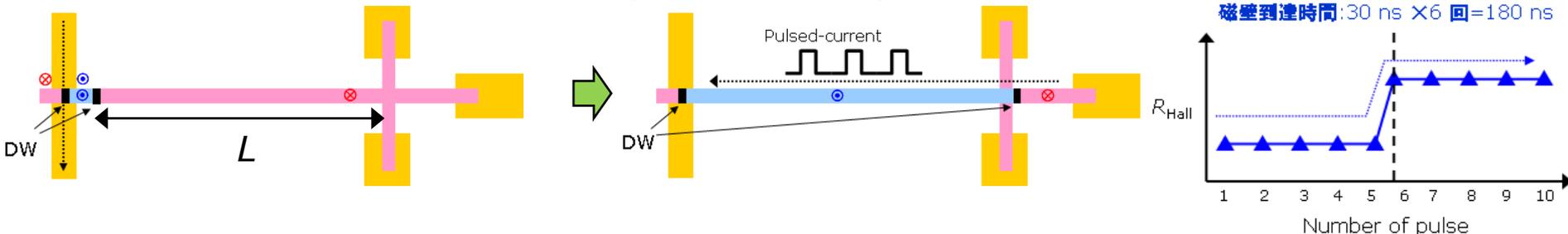
▼素子幅が細いほど低電流密度で磁壁移動。

垂直磁化材料を使うことで、しきい電流密度を低減できることを実証

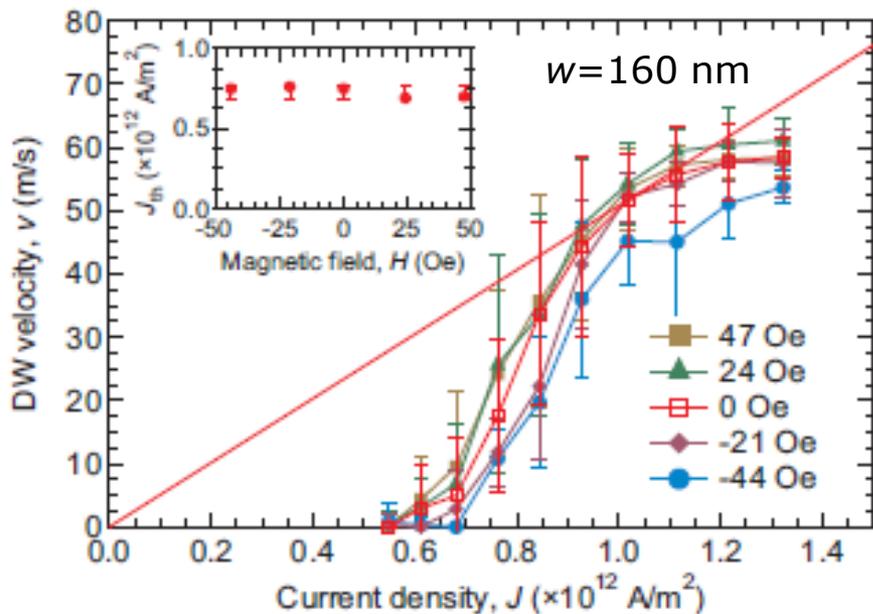
Co/Ni細線中磁壁の移動速度測定

▼磁壁移動速度を電気的検出によって測定。

▼磁壁速度 \div Co/Ni細線の長さ L \div (パルス幅 \times 回数)



▼磁壁移動速度の電流密度依存性



▼磁壁速度は電流密度の増加とともに速くなる。

▼磁壁速度は 50 m/s @ $\sim 1 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$

⇒電気的検出によって磁壁速度を測定

★速度のばらつきは？

★移動した磁壁の形状は？

⇒直接的な磁区観察が必要。

T. Koyama, et. al., Appl. Phys. Lett. **98**, 192509 (2011).

outline

■ MRAM開発

- ◆MRAMの特徴
- ◆電流による磁化制御
- ◆磁壁移動型MRAM

■ 磁壁電流駆動現象

- ◆磁壁電流駆動現象の説明
- ◆低電流化を目的とした材料探索
- ◆垂直磁化材料Co/Niの実験結果

■ 放射光による磁壁移動観察

- ◆Co/Ni素子:ex-situ実験
- ◆Co/Ni素子:in-situ実験
- ◆CoFeB素子:ex-situ実験
- ◆現状の課題と今後の展開

■ まとめ

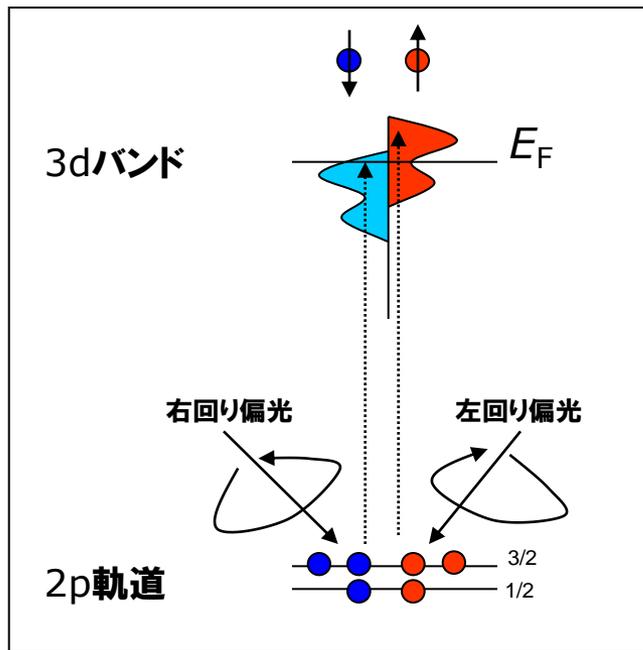
代表的な磁区観察手法

観察手法	測定原理	空間分解能	利点	欠点・課題
SMOKE	偏光角の変化	~150 nm	簡便 非接触	分解能向上
XMCD- PEEM	磁気円二色性	20-100 nm	元素選択性	表面敏感 放射光必要
MFM	探針と試料に働く磁 気力	10-20 nm	簡便 高分解能	試料の磁化状態破壊 の可能性 スキャン遅い
Spin-SEM	表面磁化による2次 電子の軌道変化	5-20 nm	高分解能	表面清浄性必要 スキャン遅い
Lorentz TEM	磁化による電子の軌 道変化	<10 nm	高分解能 磁束分布測定可	試料薄片化が必要

100 nm幅程度の素子の磁化状態を乱さずに観察するには、XMCD-PEEMが適している。

放射光による磁区観察の原理

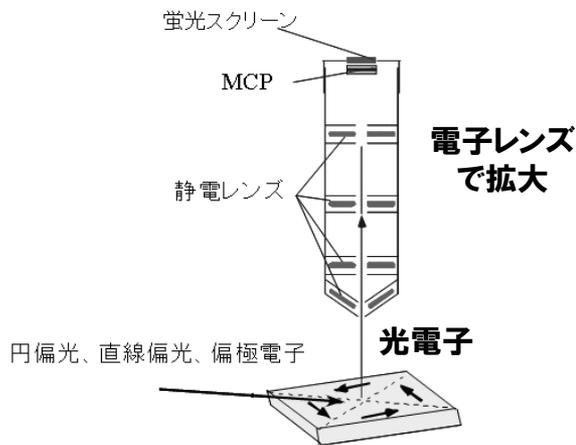
▼XMCD X線磁気円二色性



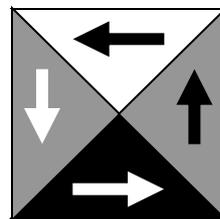
円偏光の右回り/左回り、スピンのアップ/ダウンで電子の遷移確率が異なる。

偏光の回る向きを反転させて光電子強度の差をとれば、X線入射方向と磁化方向の違いでコントラストがつく。

▼装置の概念図

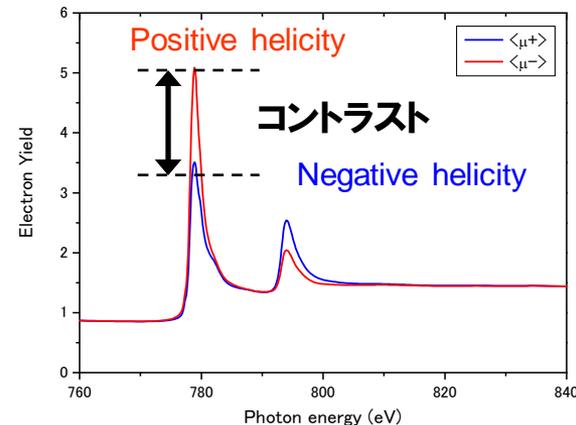


X-ray



磁化配置(磁区)が見える

▼光電子スペクトル



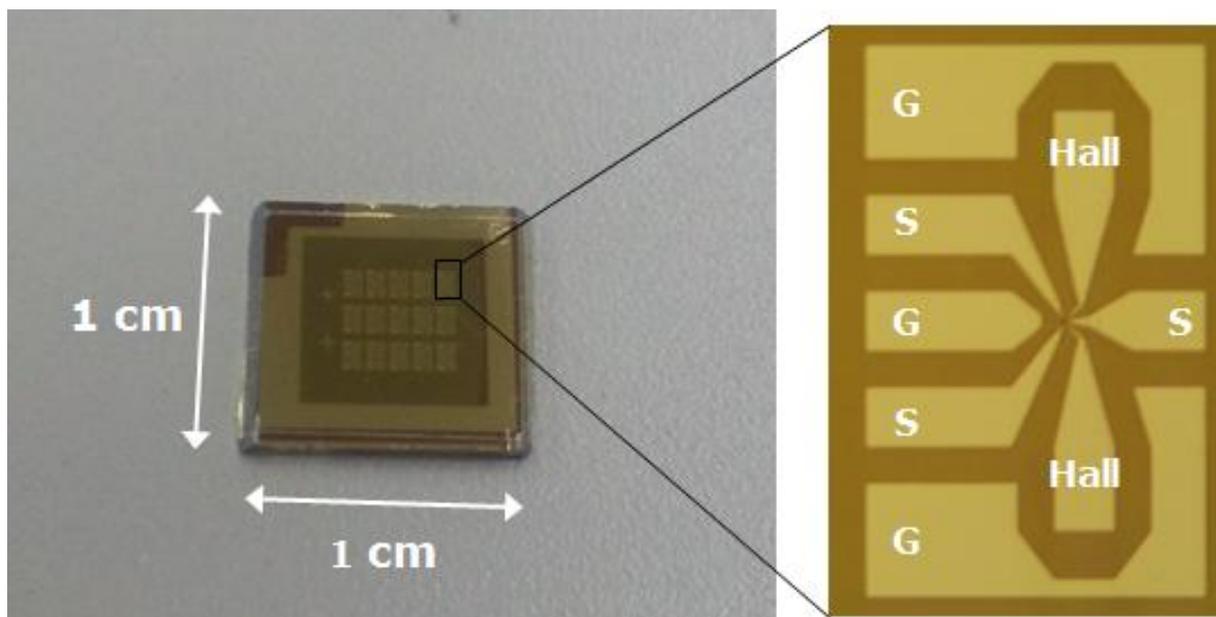
試料への磁場の影響がなく、高分解能な磁区観察が可能

BL17SU : SPELEEM
BL25SU : PEEM

観察試料の概要 (ex-situ)

試料

- ▼磁性膜: Pt(1.6 nm)/[Co(0.3)/Ni(0.9)]₄/Co(0.3)/Pt(1.6)/Ta(3)/Si sub.
- ▼細線パターン: 1×1 cm²の基板に計15個のHall素子(同軸ライン構成)を形成
- ▼細線端部に磁壁導入/電流注入用電極(Ta/Au:線幅500 nm)とpad & Hall素子用Ta細線
- ▼光学顕微鏡観察



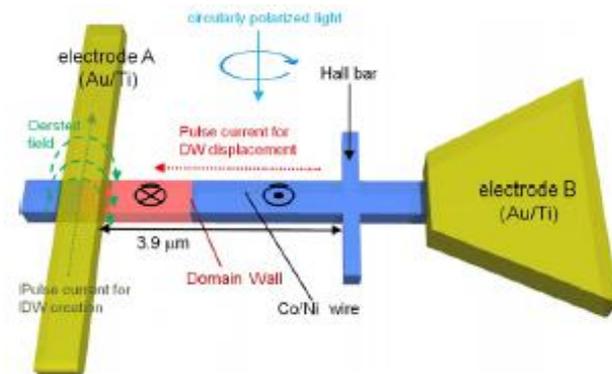
▼観察装置外で磁壁導入
(+電流駆動)

▼同形状の素子を多数個
観察

SPELEEMによるCo/Niの磁壁移動観察

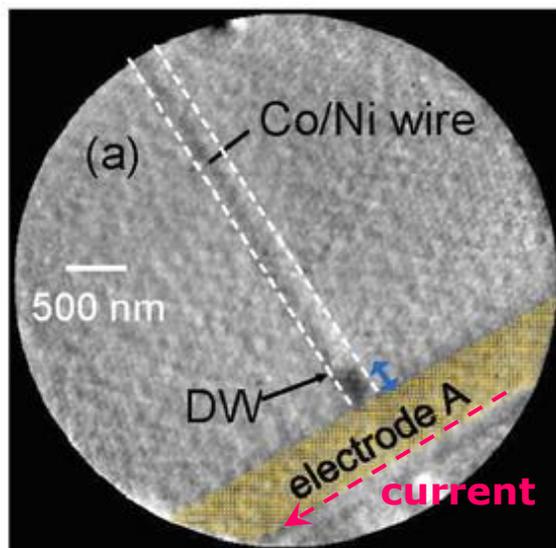
▼BL17SU SPELEEMによる観察

⇒ 予めパルス電流を印加した素子・印加していない素子を用意し、磁壁位置の比較を行う。

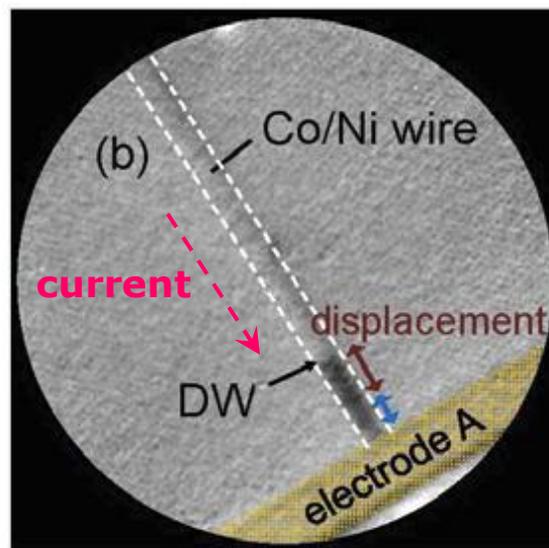


N. Ohshima, *et. al.*, J. Phys.: Condense Matter **23**, 382202 (2011).

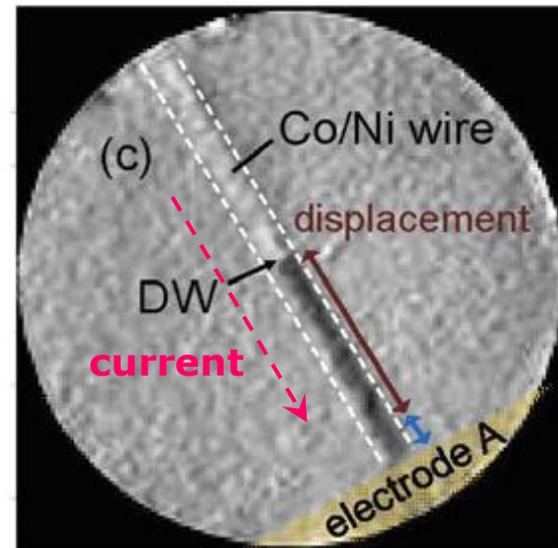
▼磁壁導入のみ



▼10 ns × 1 pulse



▼10 ns × 3 pulse



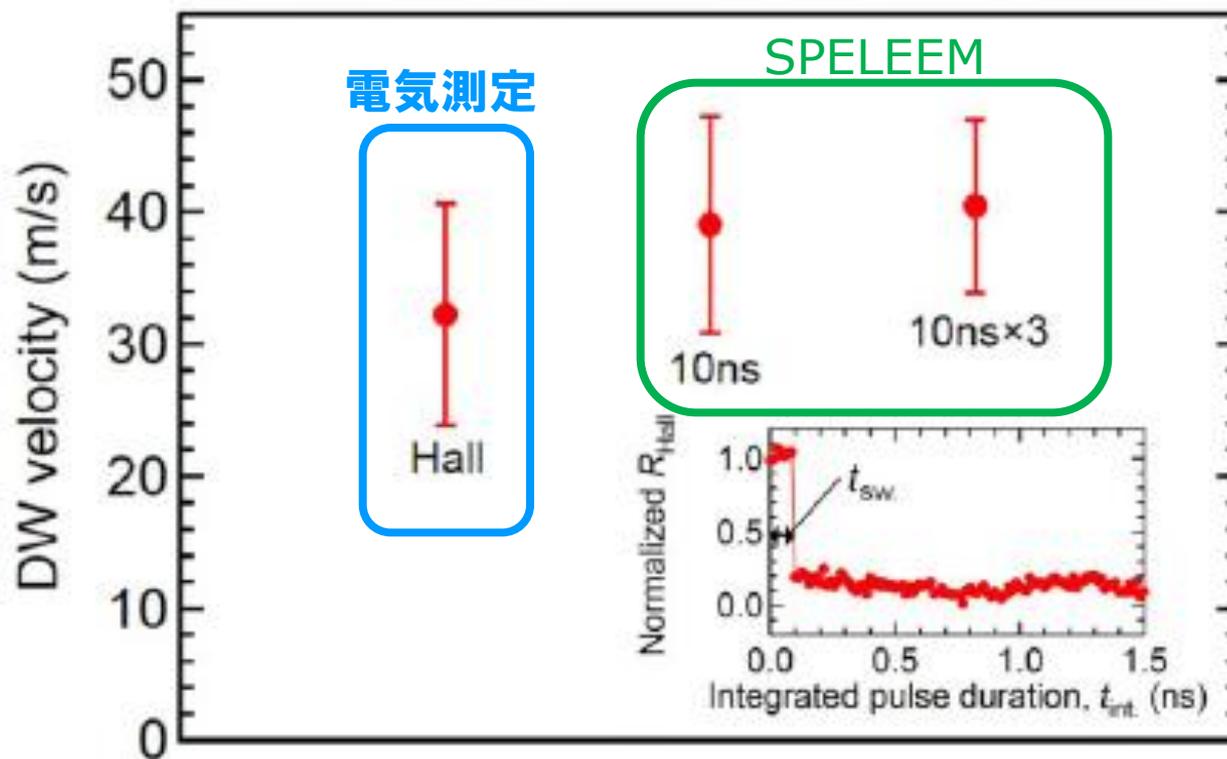
▼パルス電流印加(2.5×10^{12} A/m², 10 ns)に伴う磁壁移動を観察

▼パルス電流印加後の磁壁形状は、細線長手方向に垂直

電気測定との整合性

▼ $w=150$ nm素子でHall測定&SPELEEM観察結果を比較

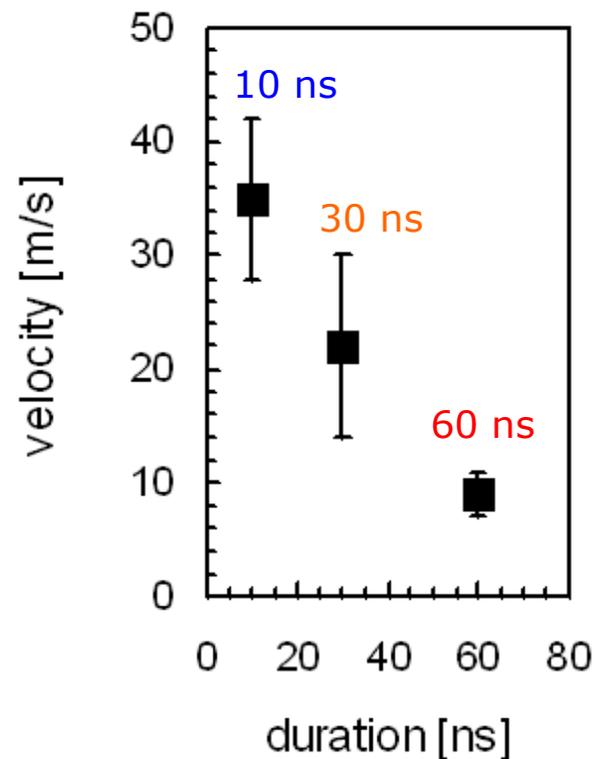
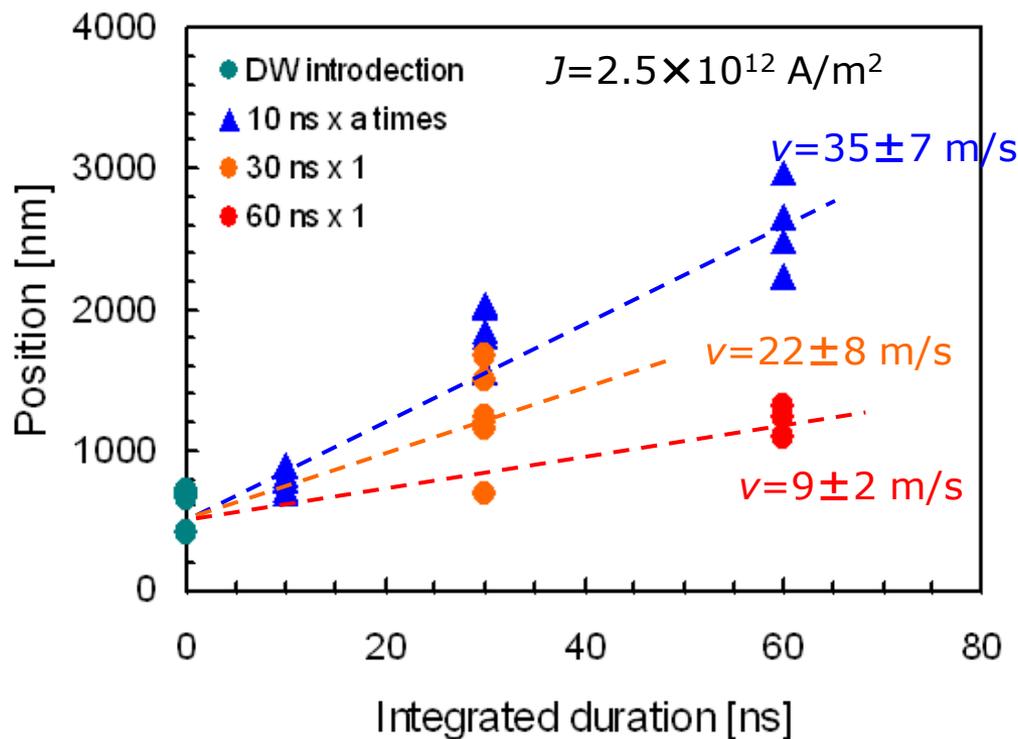
▼ $J=2.5 \times 10^{12}$ A/m², duration=10 ns



電気測定とSPELEEM測定での速度は良い一致を示した。

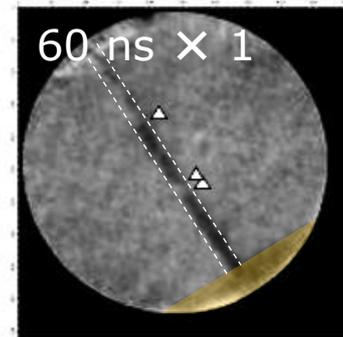
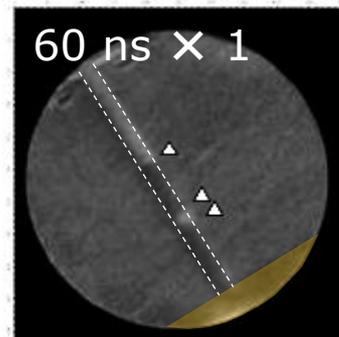
N. Ohshima, *et. al.*, J. Phys.: Condense Matter **23**, 382202 (2011).

印加パルス幅と磁壁移動距離の関係



- ▼ パルス幅が長いほうが速度が遅い傾向が見られた。
- ▼ 60 nsパルス印加後に多磁区化現象も観察された。

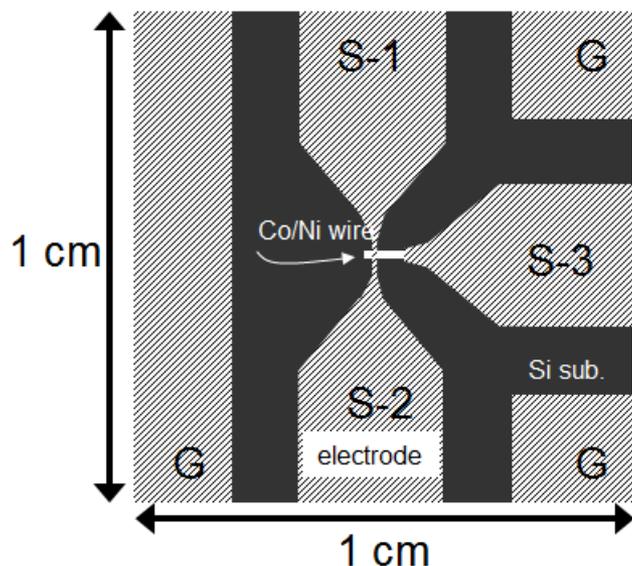
⇒ 素子温度上昇によるスピン分極率の低下が原因と考えられる。



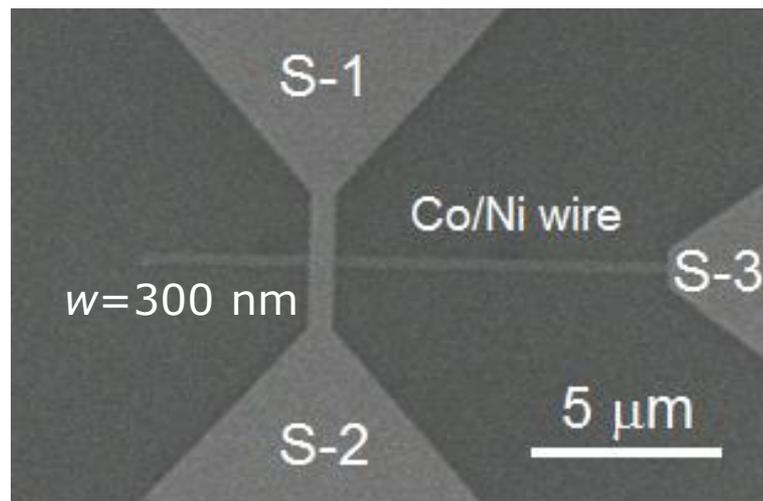
放射光による磁壁移動その場観察 (in-situ)

- ▼ 単一素子における電流印加前後の磁区観察(in-situ実験)
- ▼ SPELEEMもしくはPEEM装置内と電氣的導通を取るため、150 mm以上の大パッドを付加。
- ▼ 1基板につき1素子

▼ 素子の概念図



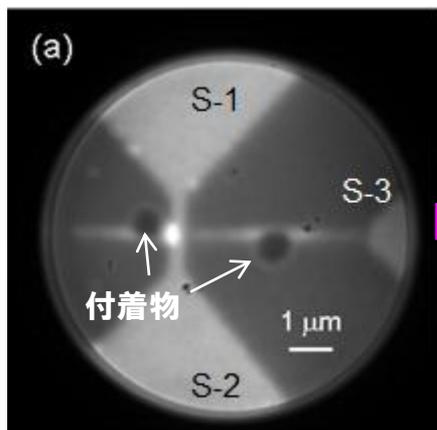
▼ Co/Ni細線部のSEM観察像



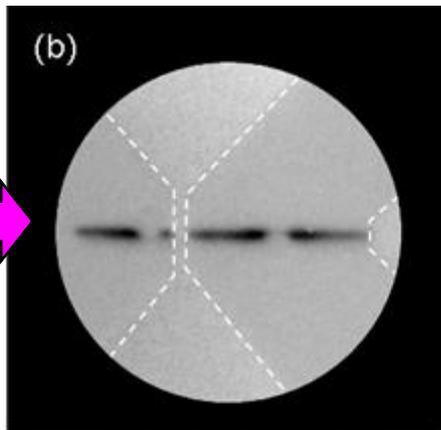
- ▼ 観察装置内で磁壁導入+電流駆動
⇒ 単一素子における磁壁速度ばらつき^きの定量化が目的

SPELEEMによるCo/Niの磁壁移動観察

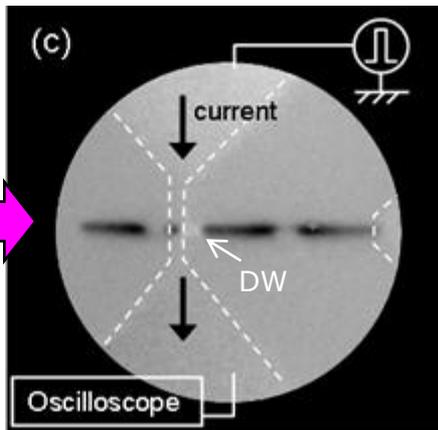
▼形状像



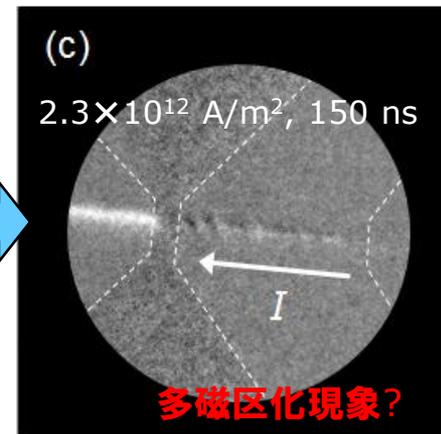
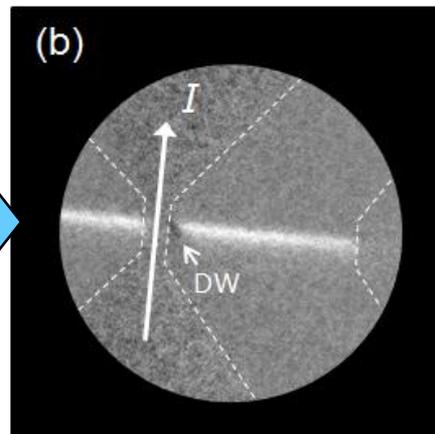
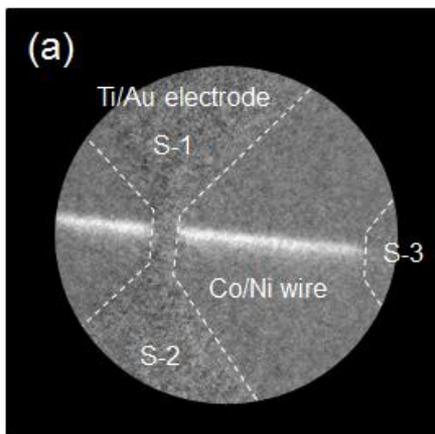
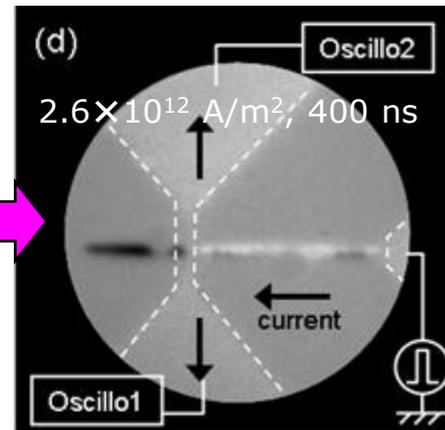
▼単磁区化



▼磁壁導入



▼電流駆動後



▼電流磁場印加による磁壁導入は成功。

▼Joule熱による素子温度上昇のため、明確な磁壁電流駆動の観察像が取得できていない。

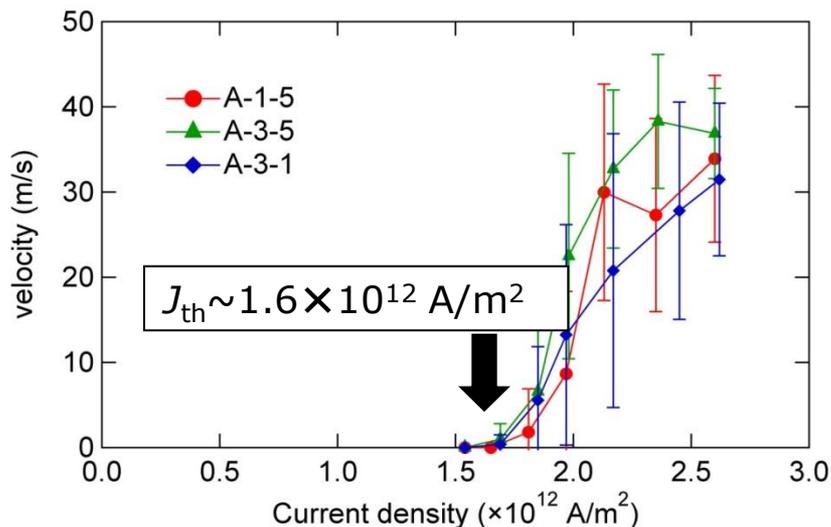
Co/Ni磁壁移動その場観察の課題

▼SPELEEM観察で用いた試料

Pt(1.6)/[Co(0.3)/Ni(0.9)]₄/Co(0.3)

/Pt(1.6)/Ta(3)/Si sub.

⇒cap-seed層が非対称

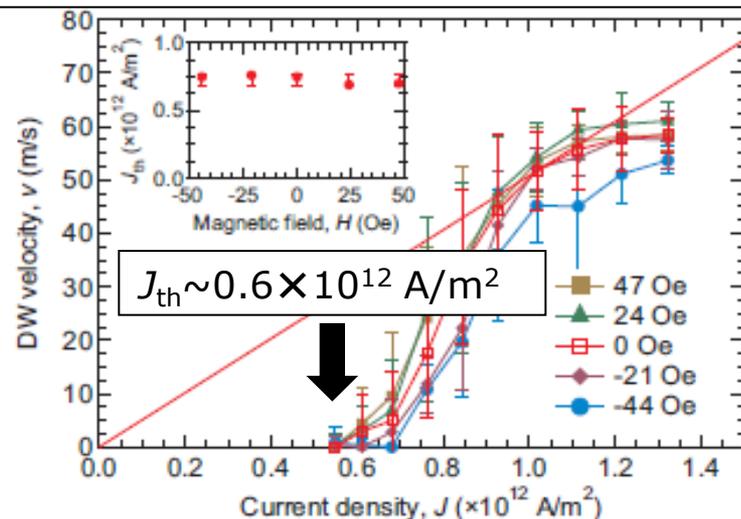


▼T. Koyama, et. al., Appl. Phys. Lett.

Ta(3)/Pt(1.5)/[Co(0.3)/Ni(0.9)]₄/Co(0.3)

/Pt(1.5)/Ta(3)/Si sub.

⇒cap-seed層が対称



▼cap-seed層が非対称構造だと、しきい電流密度 J_{th} が増大? [←spin Hallトルクの寄与?]

<課題>

1. 放射光で磁区観察可能な磁成膜積層構成の最適化 (←cap-seed層対称化など)
2. より短いパルス幅が印加可能な環境を構築 (←全同軸ライン化)

放射光によるCo/Ni素子の磁壁移動観察 まとめ

▼放射光を用いて垂直磁化Co/Ni膜の磁壁移動を直接観察

[ex-situ]

- ◆明瞭な磁壁移動を観察
- ◆パルス電流印加後の磁壁形状は、細線長手方向に垂直
- ◆磁壁速度は電気測定から求められた値と一致
- ◆パルス幅が長くなると磁壁速度が減少する傾向が見られた

[in-situ]

- ◆観察装置内で電流印加し、磁壁導入が行えることを確認
- ◆明瞭な電流駆動は観察されなかった。

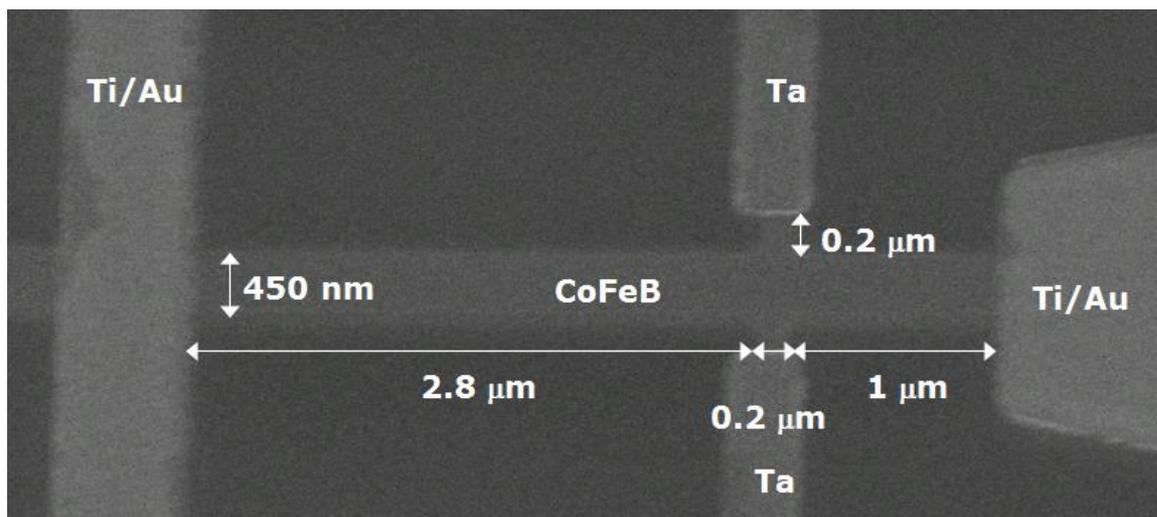
(in-situ観察での課題)

膜構成の最適化、および時短パルス印加可能な環境構築

低電流動作磁性材料:垂直磁化CoFeB (ex-situ)

- ▼Ta(1 nm)/MgO(1.45)/CoFeB(1)/Ta(0.7)/**SiN(~100)/SiO₂(~100)**/Si sub.
- ▼垂直磁化CoFeB/MgOは高MR比が実現できるため、磁壁移動型MRAM材料として最適。

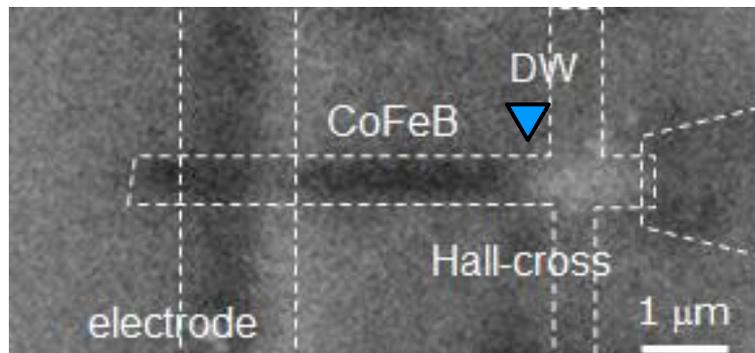
▼試料のSEM観察像



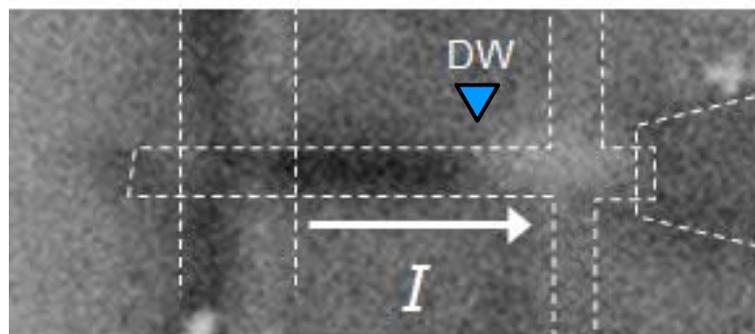
- ▼観察装置外で磁壁導入(+電流駆動)を実施後、XMCD-PEEMにて磁区観察

CoFeB素子の磁壁移動観察 (ex-situ)

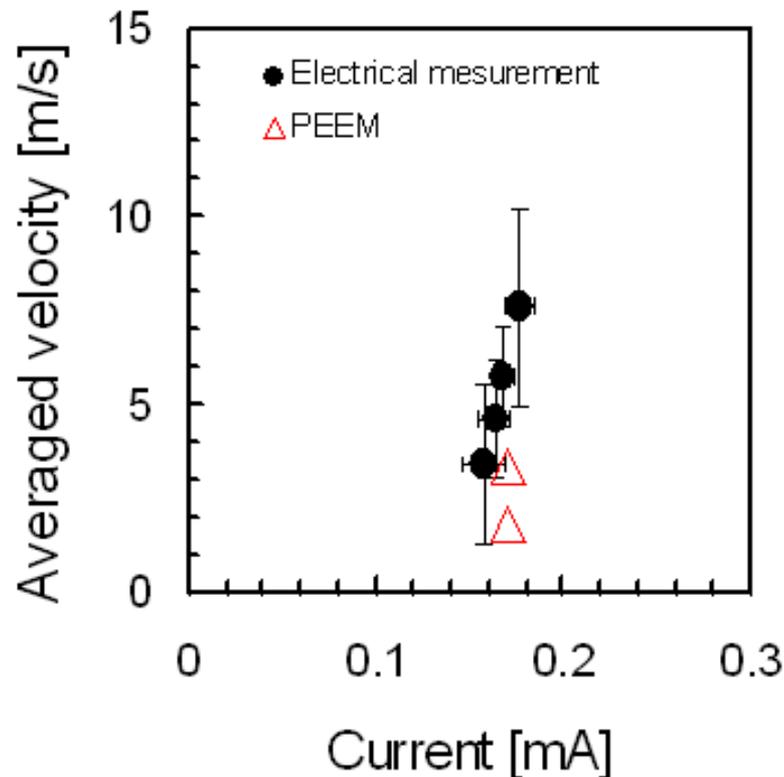
▼磁壁導入



▼電流駆動後



▼電気測定結果との比較



▼磁壁が電流と逆方向に移動していることを観察。

▼磁壁速度は3.3 m/s @ 1.4×10^{11} A/m²。電気測定結果ともほぼ一致。

<課題>

チャージアップ防止策で基板全面にAuを数nm蒸着しているため、磁化コントラストが薄い。

⇒基板材料の最適化

今後の展開

▼磁壁移動現象のリアルタイム観察

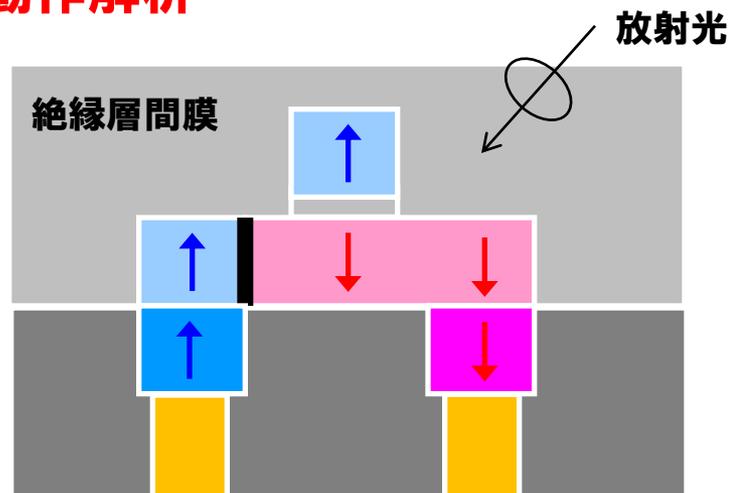
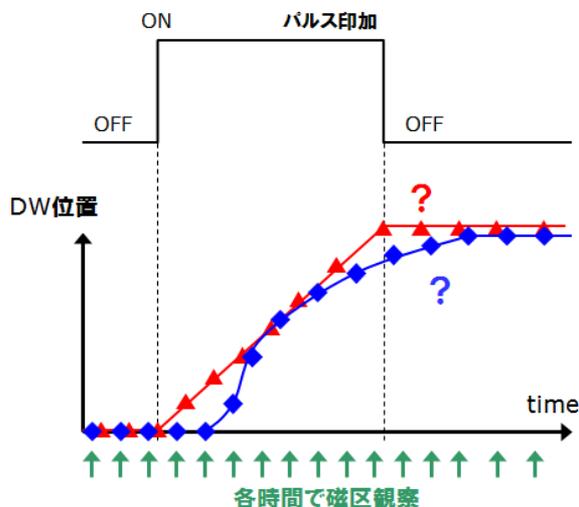
- Co/Ni in-situ実験は膜構成の最適化を行えば可能になる見込み。
- 今後CoFeB素子におけるin-situ実験に繋げたい。

⇒放射光と同期させたダイナミクス観察

▼MRAM実デバイスでの磁壁移動観察

- SPELEEM, PEEMは表面敏感な測定
- 磁性材料の上に層間膜が存在する実デバイスの磁区観察

⇒実デバイスでの動作検証、誤動作素子の動作解析



本講演のまとめ

▼MRAM

- 電流書き込み方式 [スピン注入磁化反転、磁壁移動、スピンホール]
- 磁壁移動型MRAM

▼磁壁電流駆動現象

- 材料面の検討:垂直磁化材料
- Co/Ni細線での磁壁電流駆動
- 素子幅微小化でしきい電流密度減少

▼放射光による磁壁移動現象の観察

- Co/Ni素子のex-situ電流印加実験で、明瞭な磁壁移動を観察
- Co/Ni素子のin-situ電流印加実験では、移動未観察。膜構成の最適化が必要
- ex-situでCoFeB素子の磁壁移動観察に成功

▼今後の展開

- 磁壁移動のリアルタイム測定。放射光と同期させたダイナミクス観察
- 実デバイスの磁区観察を行うことで動作検証、誤作動素子の動作解析

RENESAS

ルネサス エレクトロニクス株式会社