

XMCD-PEEMによる磁壁移動型 MRAM磁性パターンの動的磁区観察

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

大嶋則和

共同研究者

NEC:

沼田秀昭、深見俊輔、永原聖万^{*)}、谷川博信^{*)}、鈴木哲広^{*)}、五十嵐忠二、石綿延行

^{*)} 現ルネサスエレクトロニクス

SPring-8:

福本恵紀^{**)}、小嗣真人、大河内拓雄、木下豊彦

^{**)} 現 東工大

京都大学:

小野輝男、葛西伸哉^{***)}、千葉大地、小山知弘

^{***)} 現NIMS

謝辞

本研究はSPring-8 2006B期戦略活用課題、2007A、2009B、2010A期重点産業利用課題で実施されました。

この研究の一部はNEDOの委託を受けて実施されました。

概要

低電力、高速動作を目指した磁壁移動型MRAMの動作過程を磁区観察により解析。

磁壁移動メモリ記録セル用サブミクロン磁性パターンの

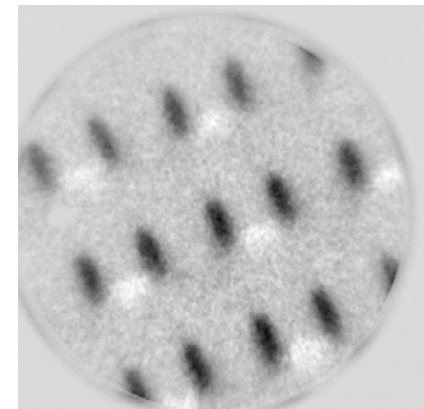
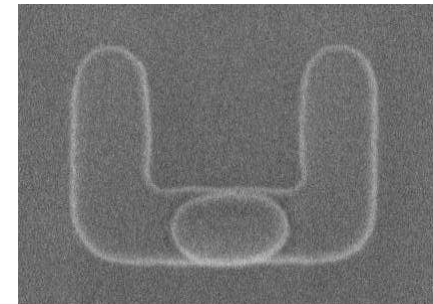
- ・ 磁化配置
- ・ 外部磁場印加による磁化配置変化
- ・ 磁壁電流駆動

を、磁気円二色性XMCD-光電子顕微鏡PEEMで観察

XMCD-PEEM :

プローブ磁場影響なく実デバイスに近いパターンが観察可能

磁性パターンのメモリセルへの適用可能性評価、
基礎動作検証、性能向上への知見



Outline

- **背景： MRAMについて**
- **磁壁移動のメモリ応用**
- **XMCD-PEEM観察**
 1. **面内磁化型NiFe Domain Wall Seesaw**
 - **磁化配置の観察と解析**
 - **in-situ磁場印加による磁壁移動観察**
 2. **垂直磁化型Co/Ni細線の観察**
- **課題とまとめ**

MRAMとは

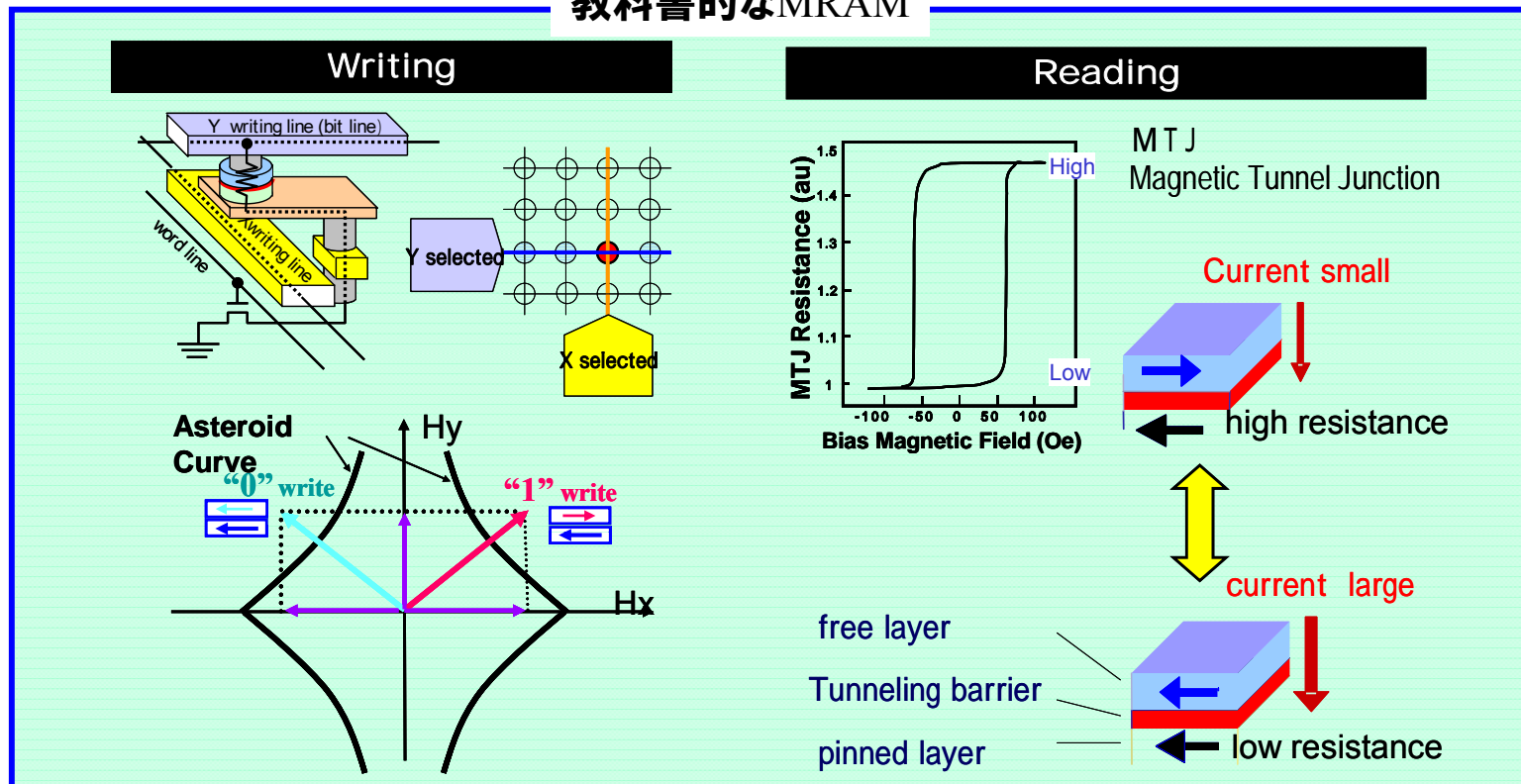
MRAM (磁気ランダムアクセスメモリ: Magnetoresistive Random Access Memory)

磁化の方向を記録情報とするメモリ

動作:

- 磁場あるいは電流による磁化反転で書き込み。
- 磁気抵抗効果を利用して読み出す。

教科書的なMRAM

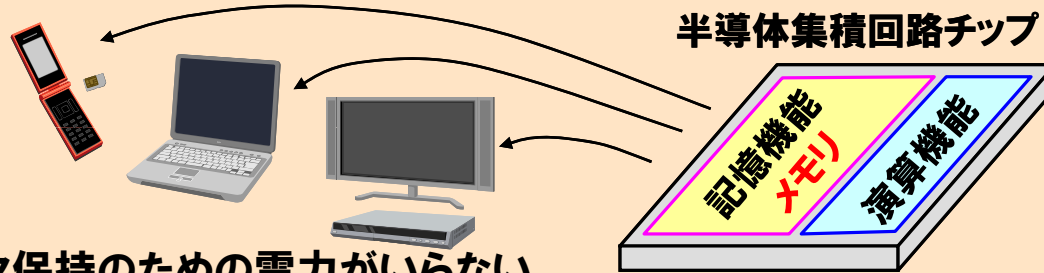


MRAMの特徴と応用

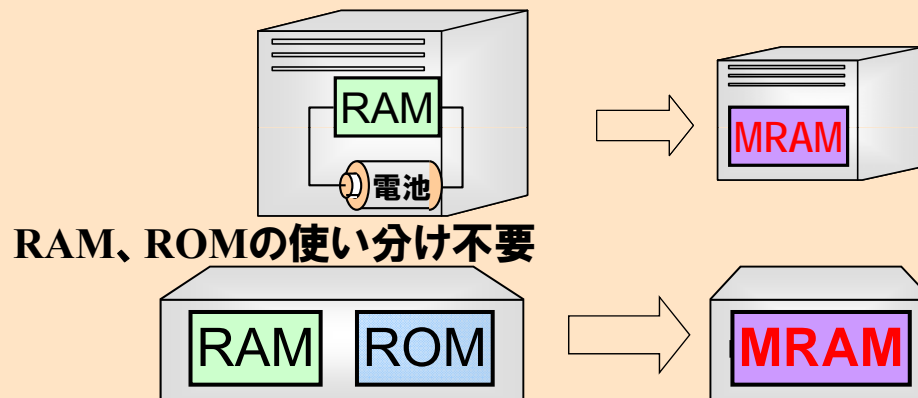
特徴: **電源OFFしてもRAMに情報が残って高速に書きかえ**

- 不揮発 磁化方向が記録情報となるため電力をおとしてもデータが消えない
- 高速動作 磁化反転はナノ秒オーダー
- 繰り返し耐性 磁化方向を何度変えても劣化しない
- 低消費電力 記録パルス短い、データ保持のための書き換え不要

瞬時に立上げ(PC、DVDレコーダ、NAVI)



データ保持のための電力がいら
ない
携帯機器が時間使用が長くなる (待機時電力「ゼロ」)



快適

省エネ

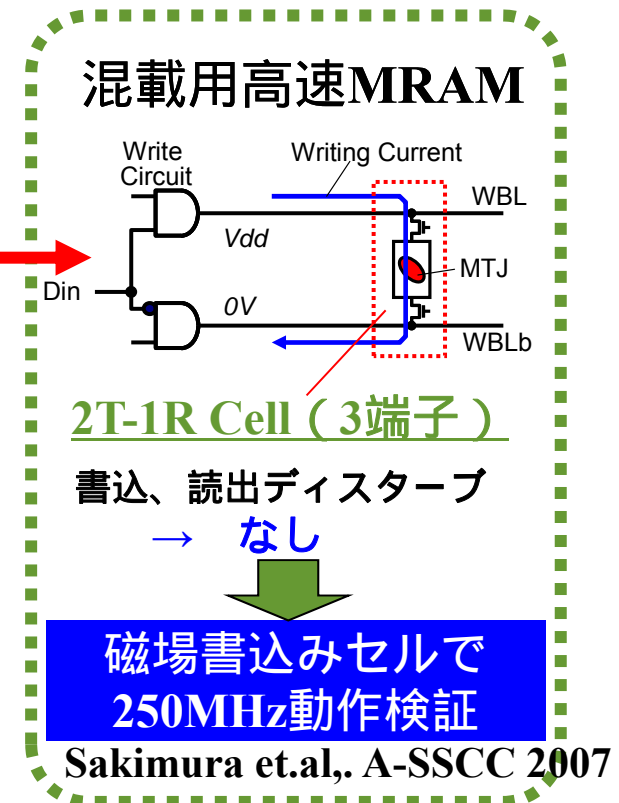
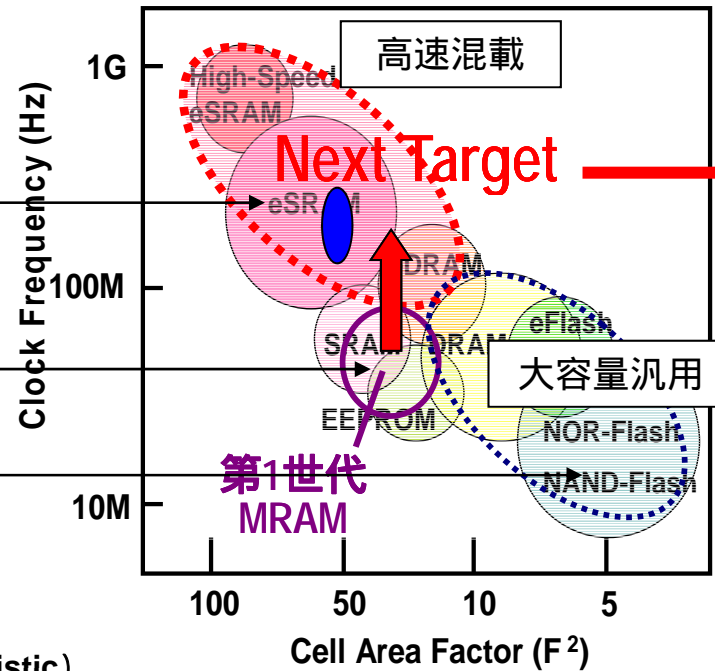
省部品

MRAM開発

- ✓ 混載RAM (eSRAM、 eDRAM) の置き換え (高速)
- 汎用DRAM、 Flashの置き換え (大容量)

2005 CY	Market (B\$)
Analog	31.9
MOS Micro	54.7
MOS Logic	57.7
MOS Memory	48.5
EEPROM	0.9
SRAM	2.8
DRAM	29.6
NOR-Flash	8.0
NAND-Flash	10.6

WSTSより
(World Semiconductor Trade Statistic)

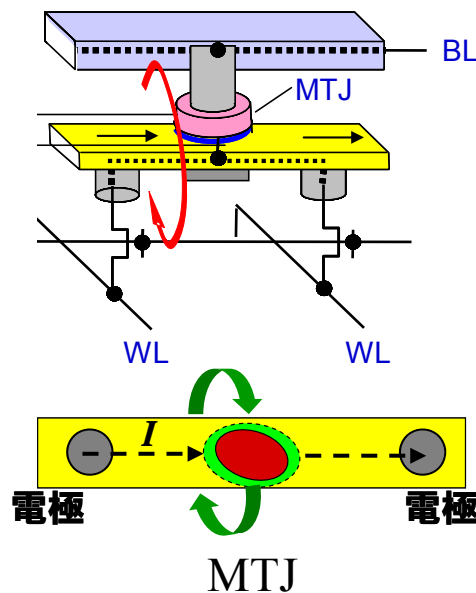


- 2T1Rセル高速MRAM：混載RAM (eSRAM、 eDRAM) を不揮発化
微細化限界 (~ 40nm世代以降) に対応
- スピントルク書込み → スケーラブルなセル実現可能性

高速動作2Tr-1MTJ 中間配線型セル

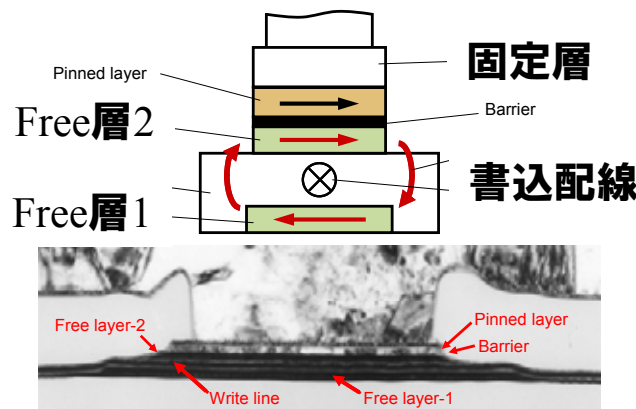
書き込み回路

2Tr-1MTJ

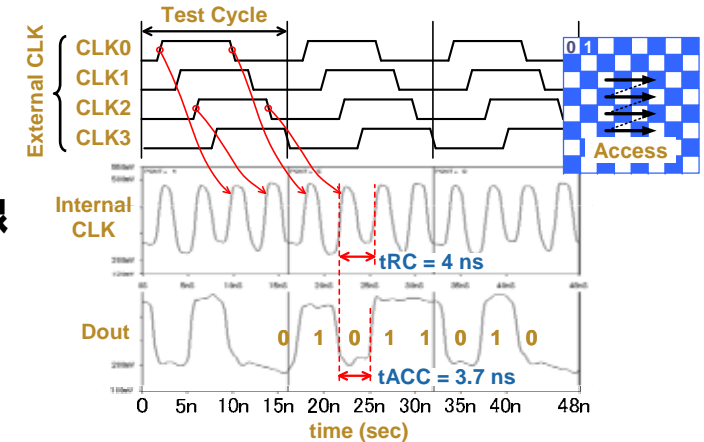


中間配線型セル

MTJ構造



動作パターン 250MHz



Clock frequency : 250 MHz
Supply voltage : 1.5 V
MR ratio : 46 %

H. HONJO *et.al.*, 52nd MMM Conference HP-01

N. Sakimura *et al.*, IEEE J. of SOLID-STATE CIRCUITS, 42-4, p.830, 2007.

**高速動作を確認 → MRAM が混載メモリに使えることを実証
 ただし、書き込み電流を1mA以下にするのは難しい**

スケーラブルなセルの検討

スケーラブル：大容量化（微細化）とともに低消費電力で高速動作

磁場書き込みMRAM:

セル微細化とともに記録電流増大（反磁界）
大きな駆動トランジスタが必要（大電流）

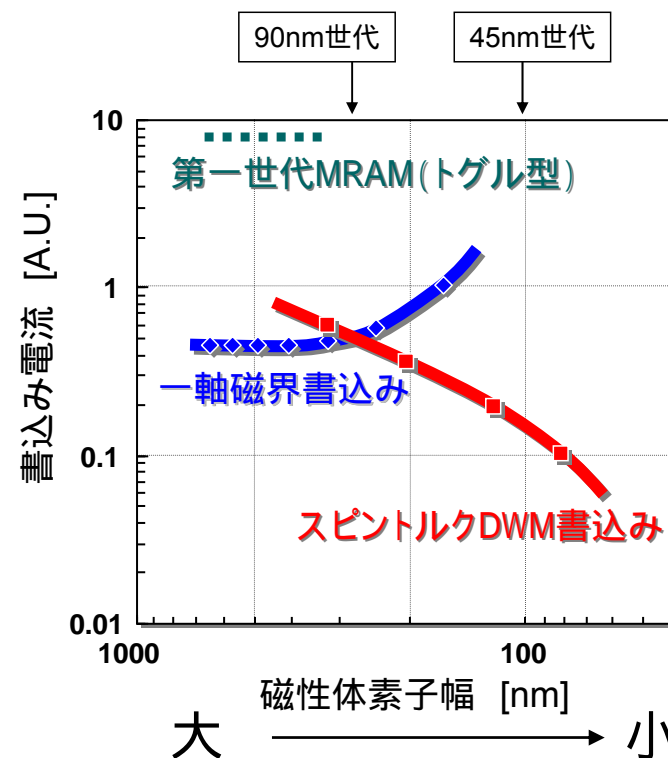
スピントルク書き込みMRAM:

電流密度に比例して磁化反転、磁壁移動
セル微細化で書き込み電流低減

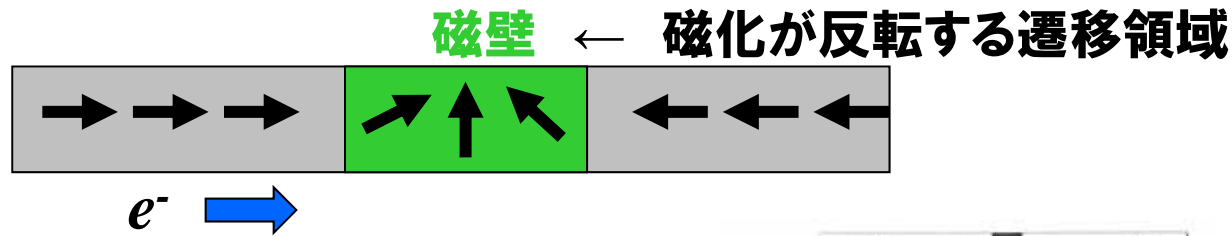
方式

- ✓ **スピン注入磁化反転**
- ✓ **磁壁電流駆動**

2Tr-1MTJ 構造 適用には磁壁移動型が容易（有利）

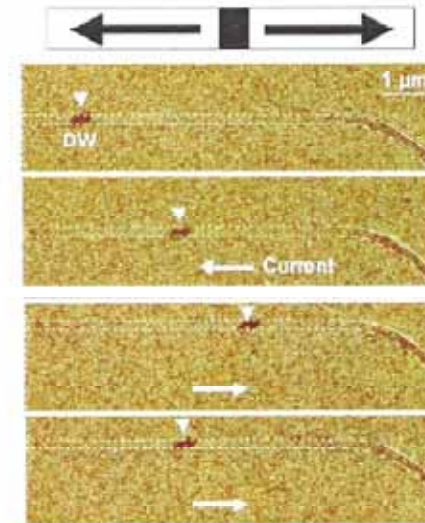


磁壁電流駆動



微小磁性体中磁壁電流駆動の特徴

1. 電子の流れる方向に可逆的な変化
電流でスイッチング可能
2. 臨界電流密度 (J_c) 以上で磁壁移動
微細素子になるほど低電流で磁壁移動
3. 電流密度が大きいほど磁壁移動
速度が増加
微細素子になるほど高速動作



J_c : 1.2×10^{12} A/m²

NiFe 10 nm, 240 nm width

τ_p 0.5 μ sec

Yamaguchi et. al., PRL, vol. 92 pp. 077205-1, 2004

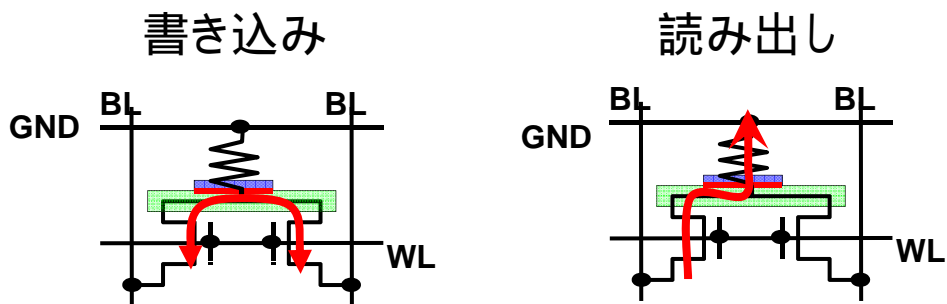
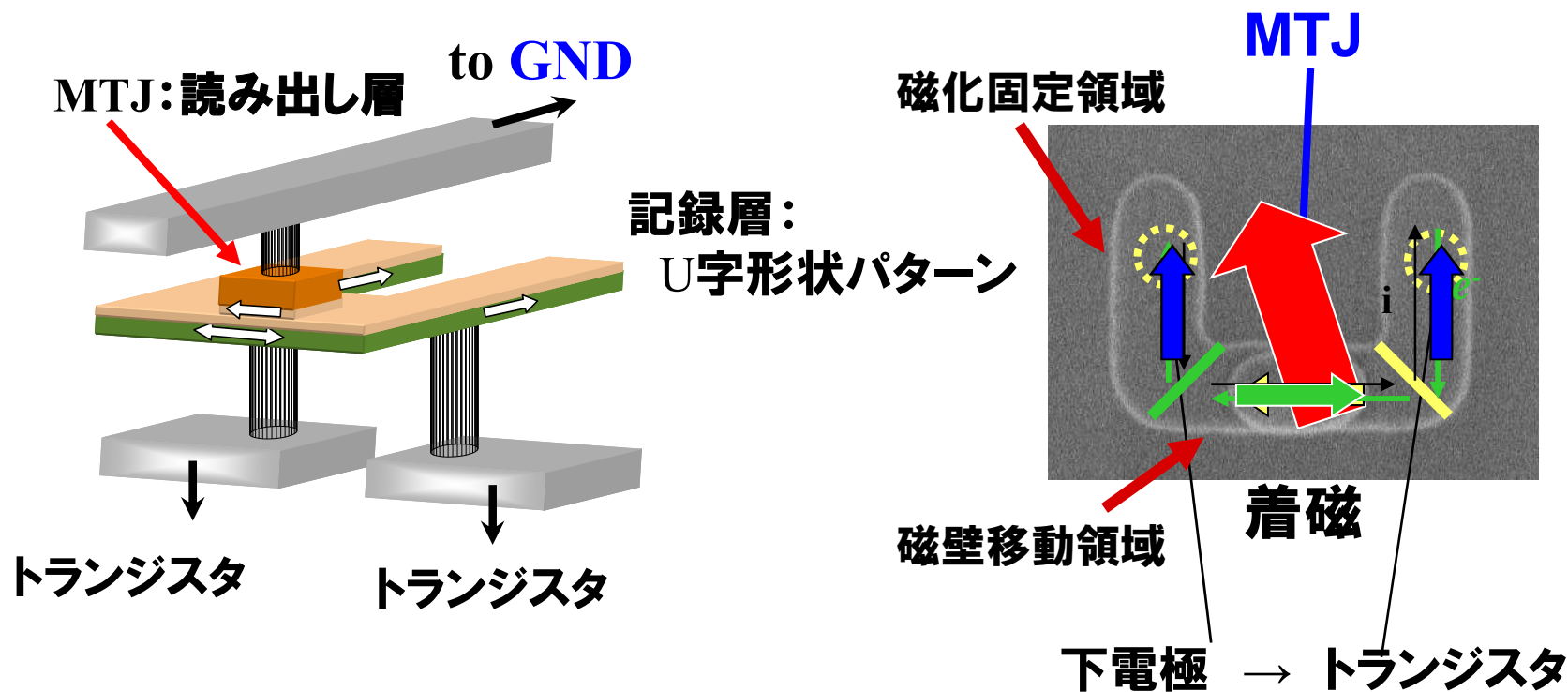
$$V \sim 3 \text{ m/s} \sim (J^2 - J_c^2)^{1/2}$$

Recent result: $V \sim 110 \text{ m/s}$

M. Hayashi, et. al. PRL98,037204 (2007)

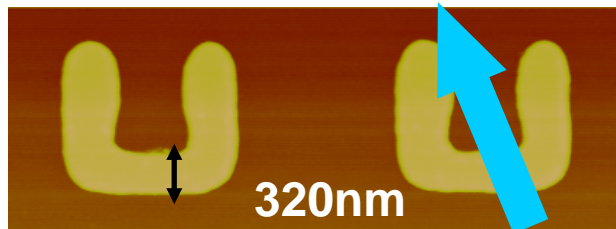
高速、高密度メモリに好適

磁壁移動メモリ その1 Domain Wall Seesaw



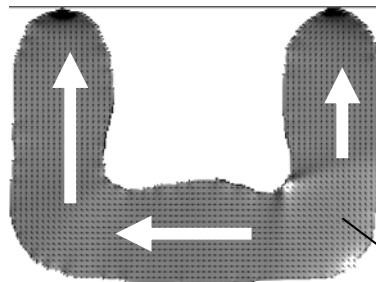
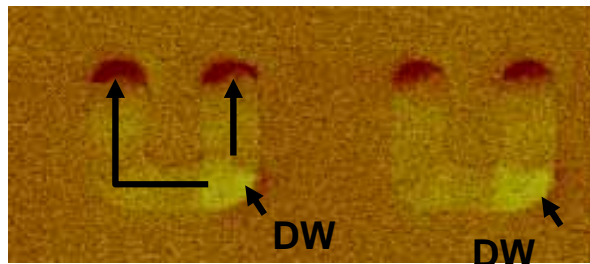
MFMM観察による動作検討

Height Image



$H=1 \text{ kOe}$, $\theta=10^\circ$

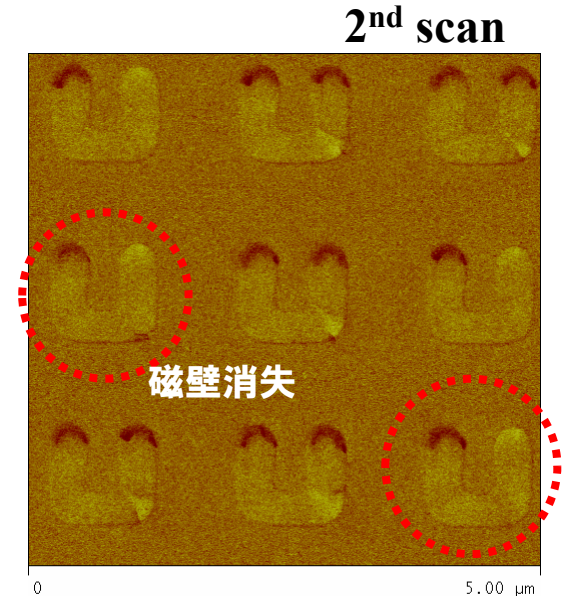
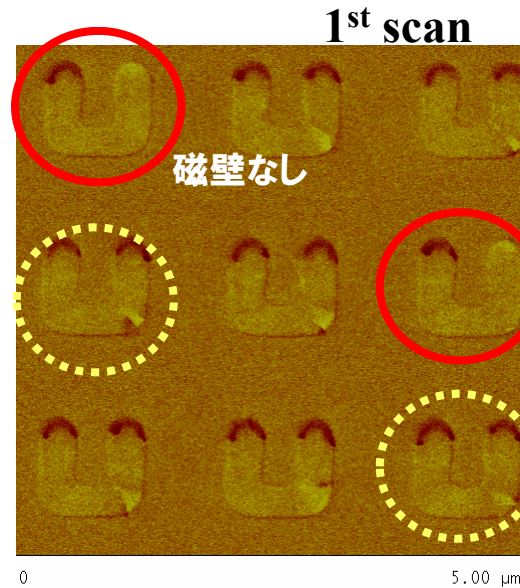
Magnetic Image



MFMM像
シミュレーション

Domain

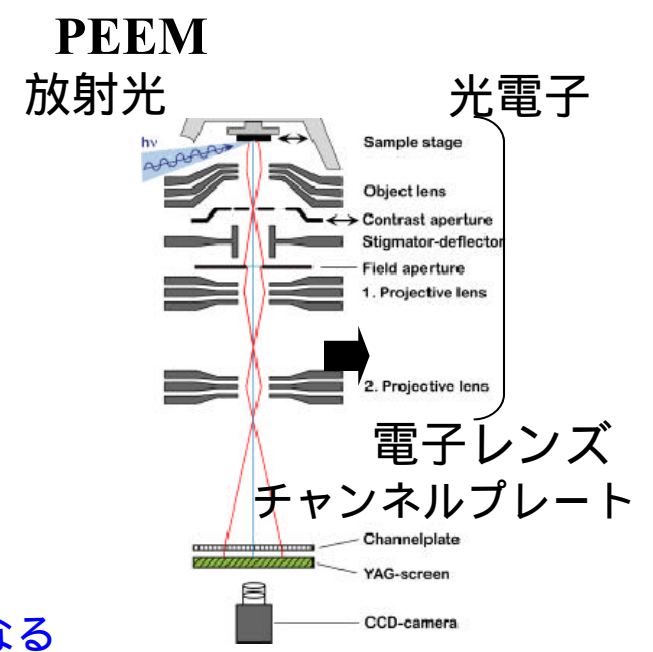
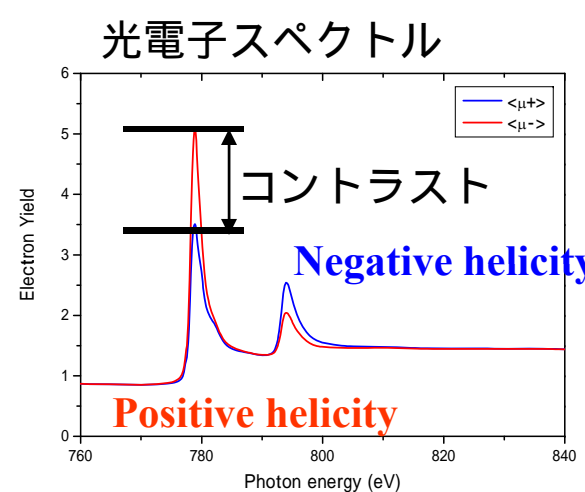
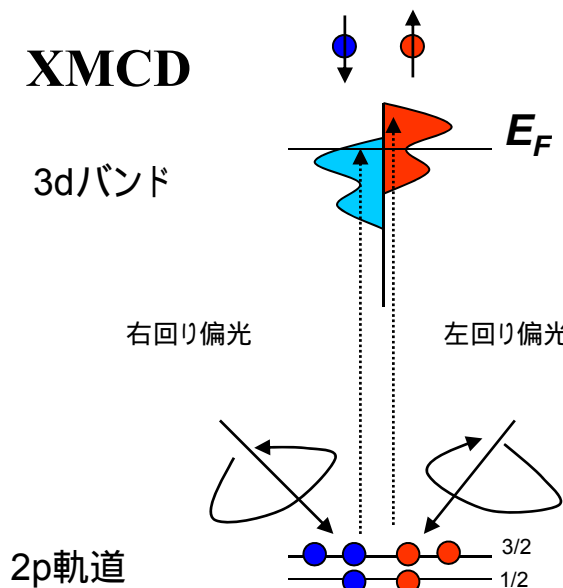
NiFe 10nm



探針磁場による磁区構造変化

観察時の磁場擾乱がない手法が必要

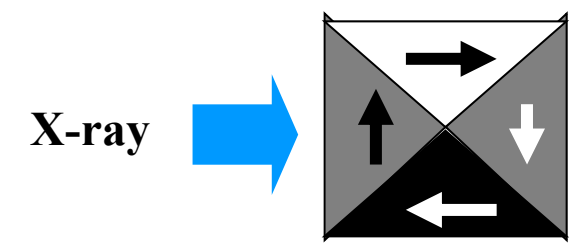
X線磁気円二色性光電子顕微鏡 (XMCD-PEEM)



円偏光の右回り / 左回りでup spin/down spinの遷移確率が異なる

右回り / 左回り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

磁化配置 (磁区) が見える



試料への磁場影響なく高分解能な磁区観察が可能
装置内で磁場印加すれば磁化配置変化が見える

分解能 ~ 100nm
元素選択性

試料

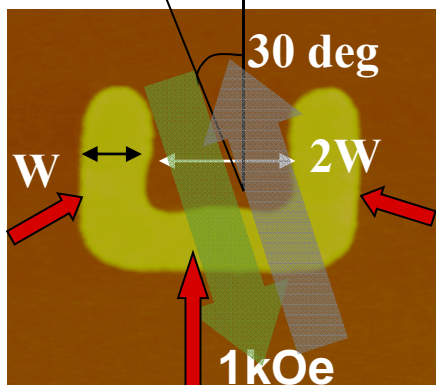
パターン形状

着磁

1.0kOe、60sec、傾斜30°

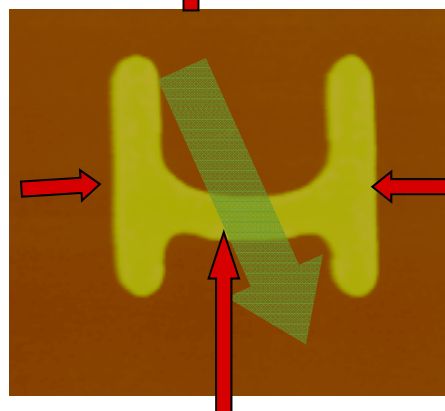
U字形状

磁化固定領域



H字形状

磁化固定領域



磁壁移動領域

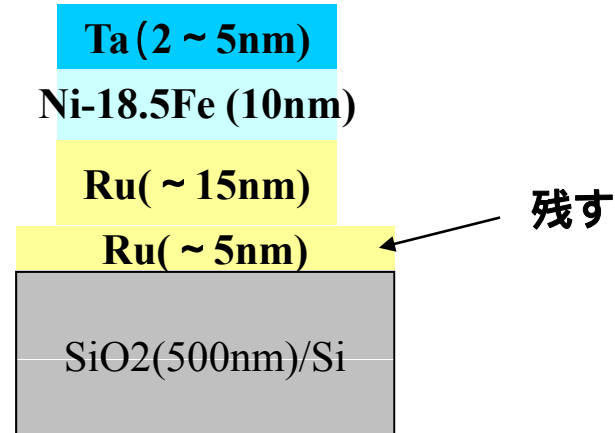
磁性膜構成

Ta/NiFe(10)/Ru(20)//SiO₂/Si sub.

微細加工

- Photo-lithography、Ar ion milling
W=320 nm
- Ru下地を約5nm残してパターン化
→チャージアップ防止

試料断面



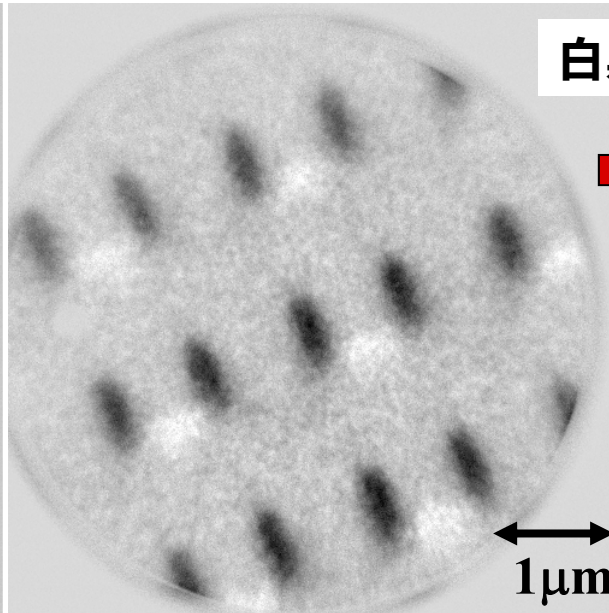
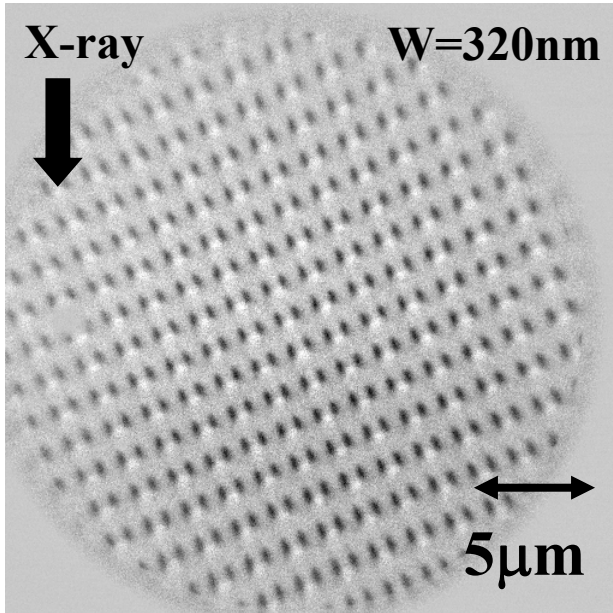
磁壁導入状態と磁場印加による磁壁移動過程の観察

U字形形状パターンの磁区イメージ

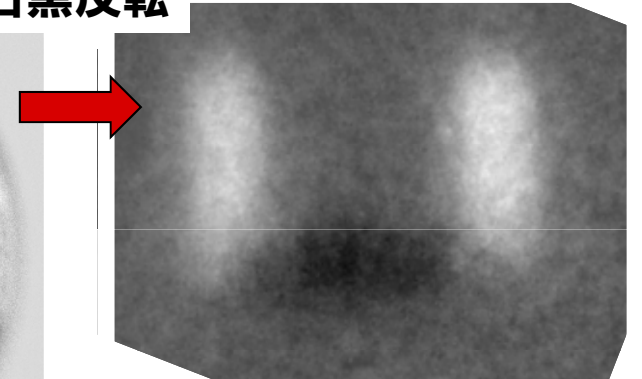
NiFe 10nm

X-ray

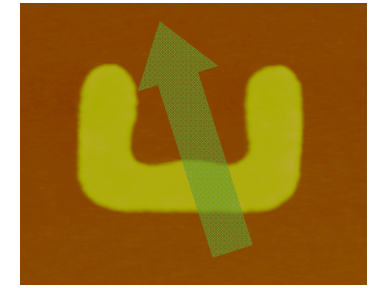
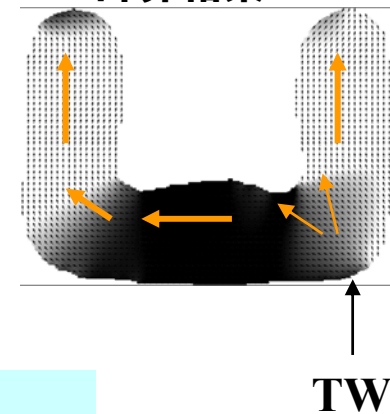
W=320nm



白黒反転



OOMMF計算結果



広範囲で一様な磁区パターンを形成
W=320nmまで安定な磁化配置

X線入射方向と磁化の関係から 右端にTail-Tailの磁区を形成

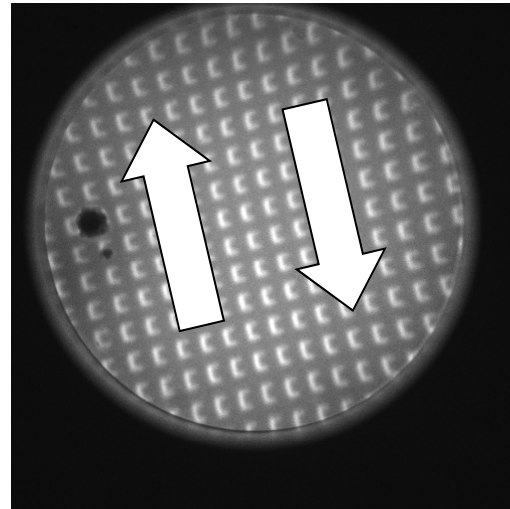
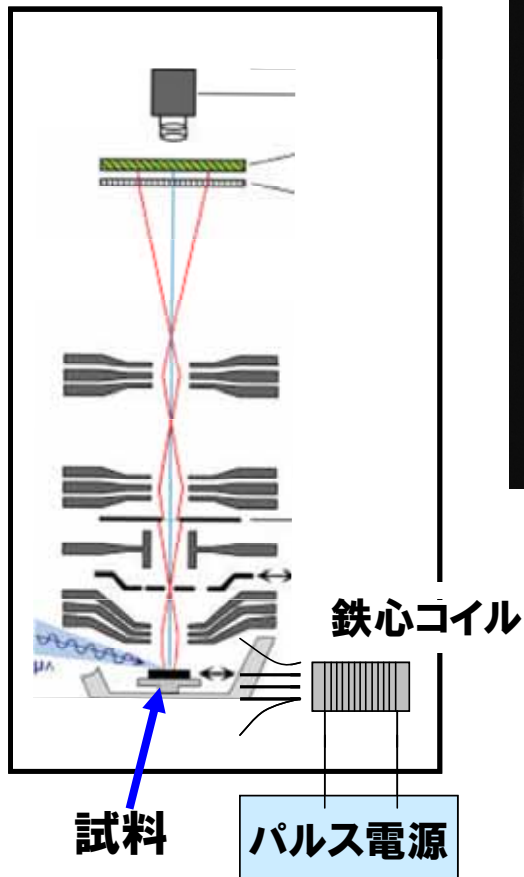
- 磁化固定領域(側面) 上向き
- 磁壁移動領域(底面) 左向き

所望の磁化配置

DWMメモリ動作に好都合な磁区構造

PEEM装置内磁場印加による磁壁移動観察

PEEM装置



磁場印加:

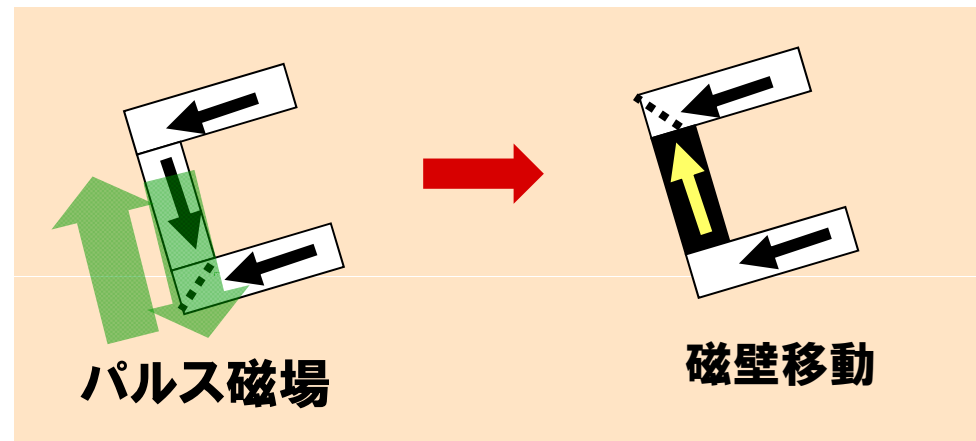
PEEM装置内に鉄心コイルを導入

Max 100Oeの磁場

磁場印加時間 約1msec

磁場印加方向

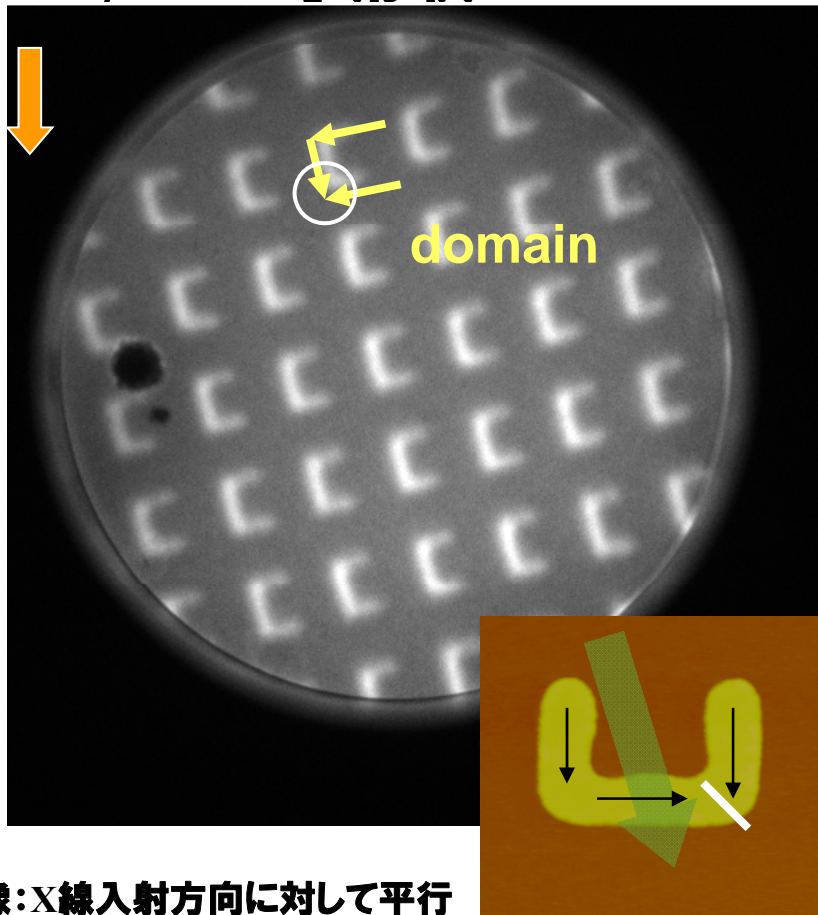
磁壁移動領域に平行/反平行方向



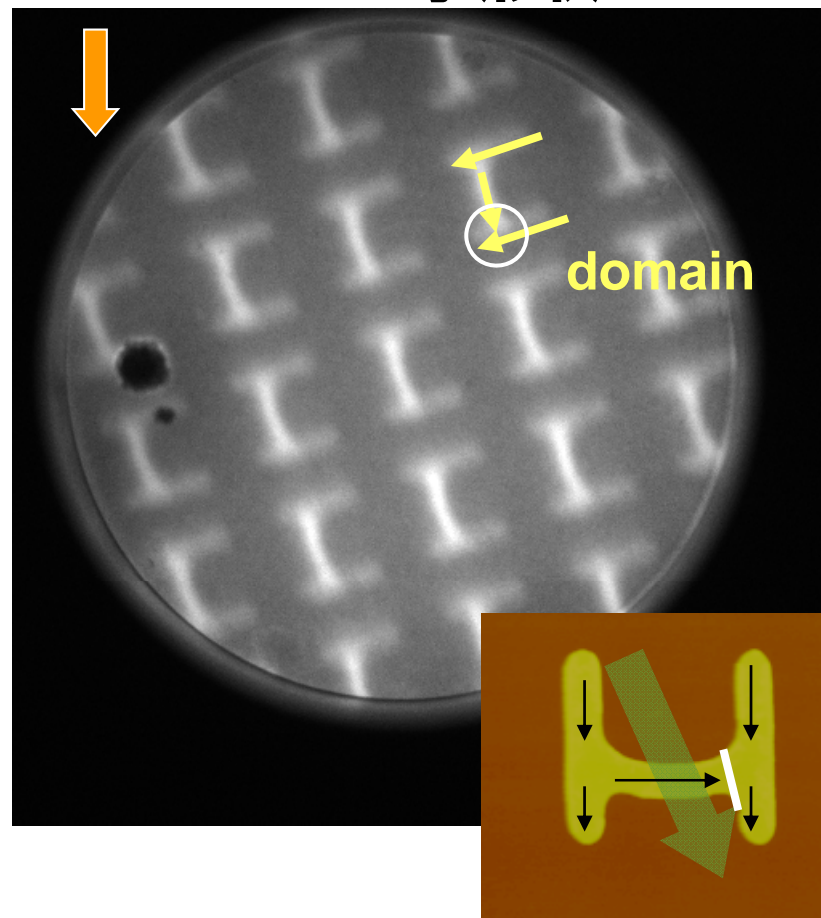
磁壁導入後のPEEM像

磁壁導入後の状態： 初期状態

X-ray U字形状



X-ray H字形状

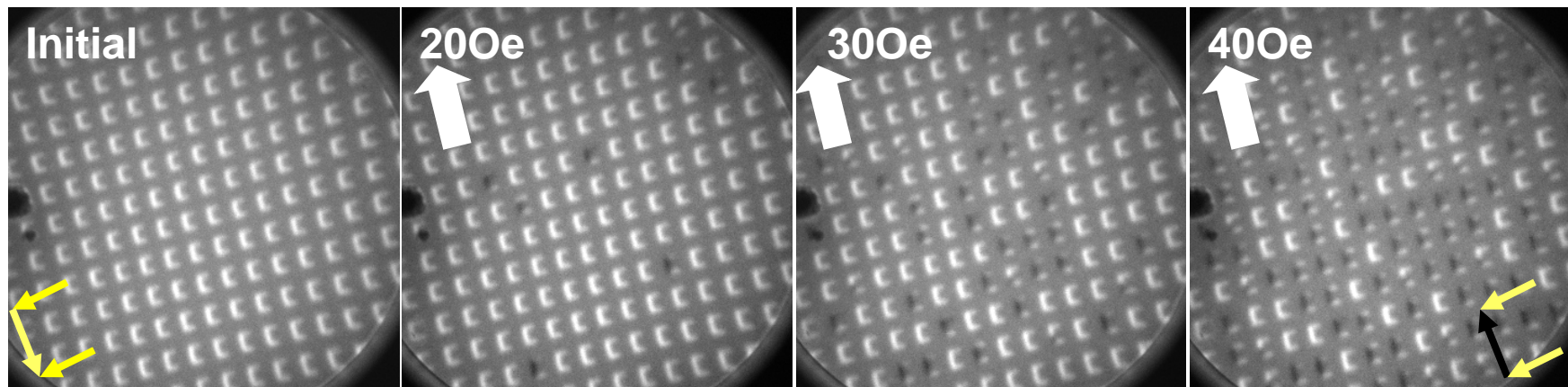


白い像：X線入射方向に対して平行
黒い像：X線入射方向に対して反平行

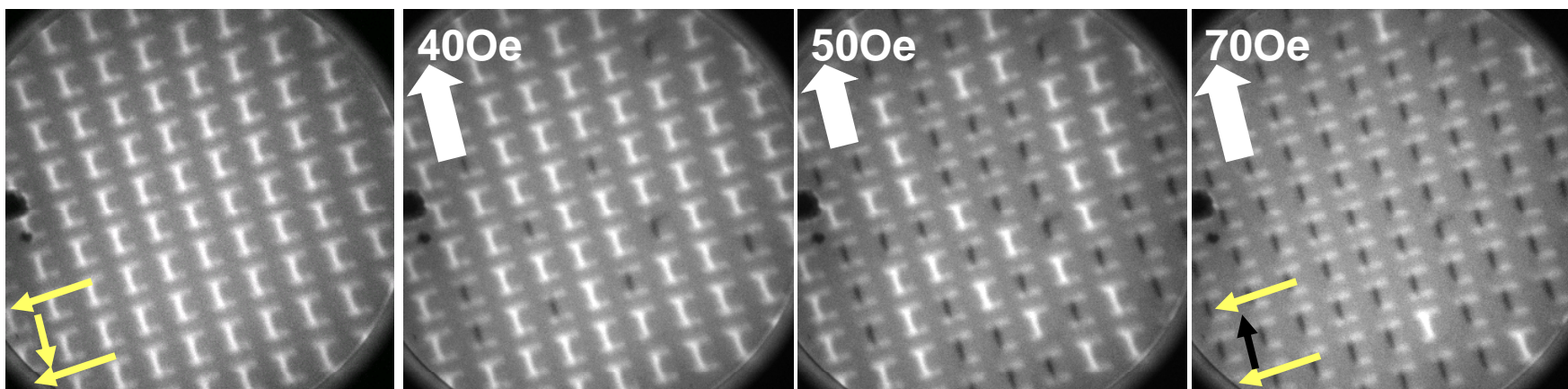
全てのパターンで所望の位置に磁壁、同一の磁化配置

磁場印加による磁化配置変化

U字形状



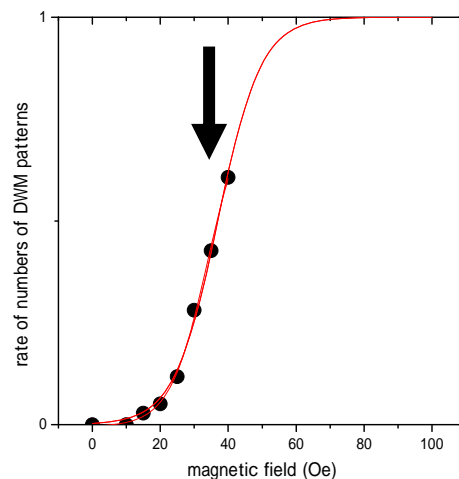
H字形状



磁場による磁壁移動を確認

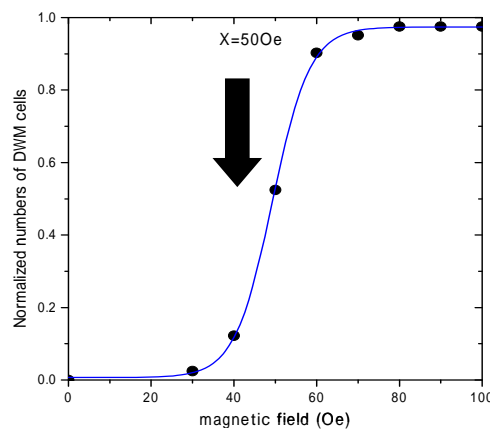
磁壁移動頻度の解析

U字形状



➤ 約35Oeでトラップサイト間移動

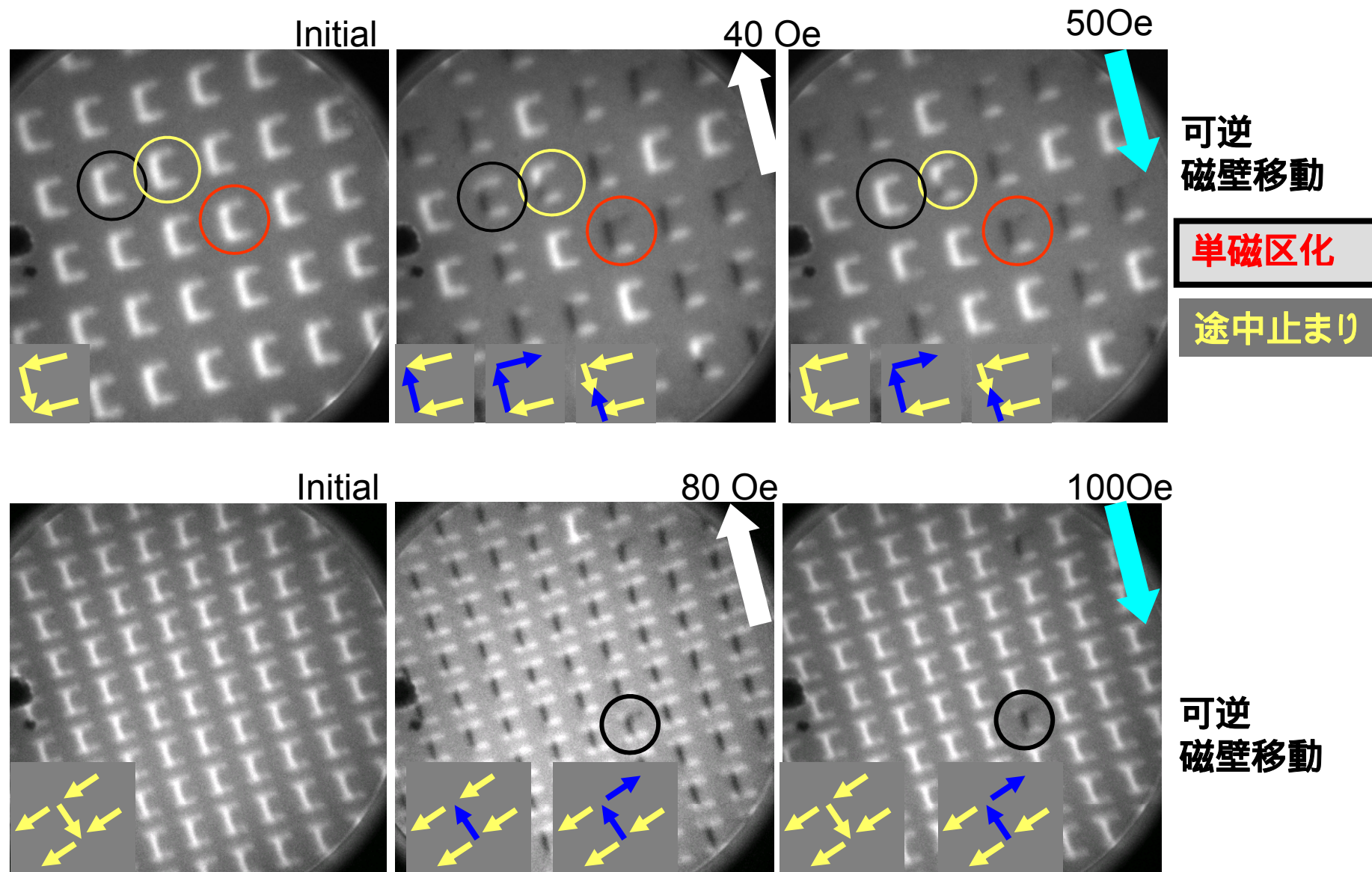
H字形状



➤ 約50Oeでトラップサイト間移動
→ 磁壁トラップエネルギーの向上
安定化

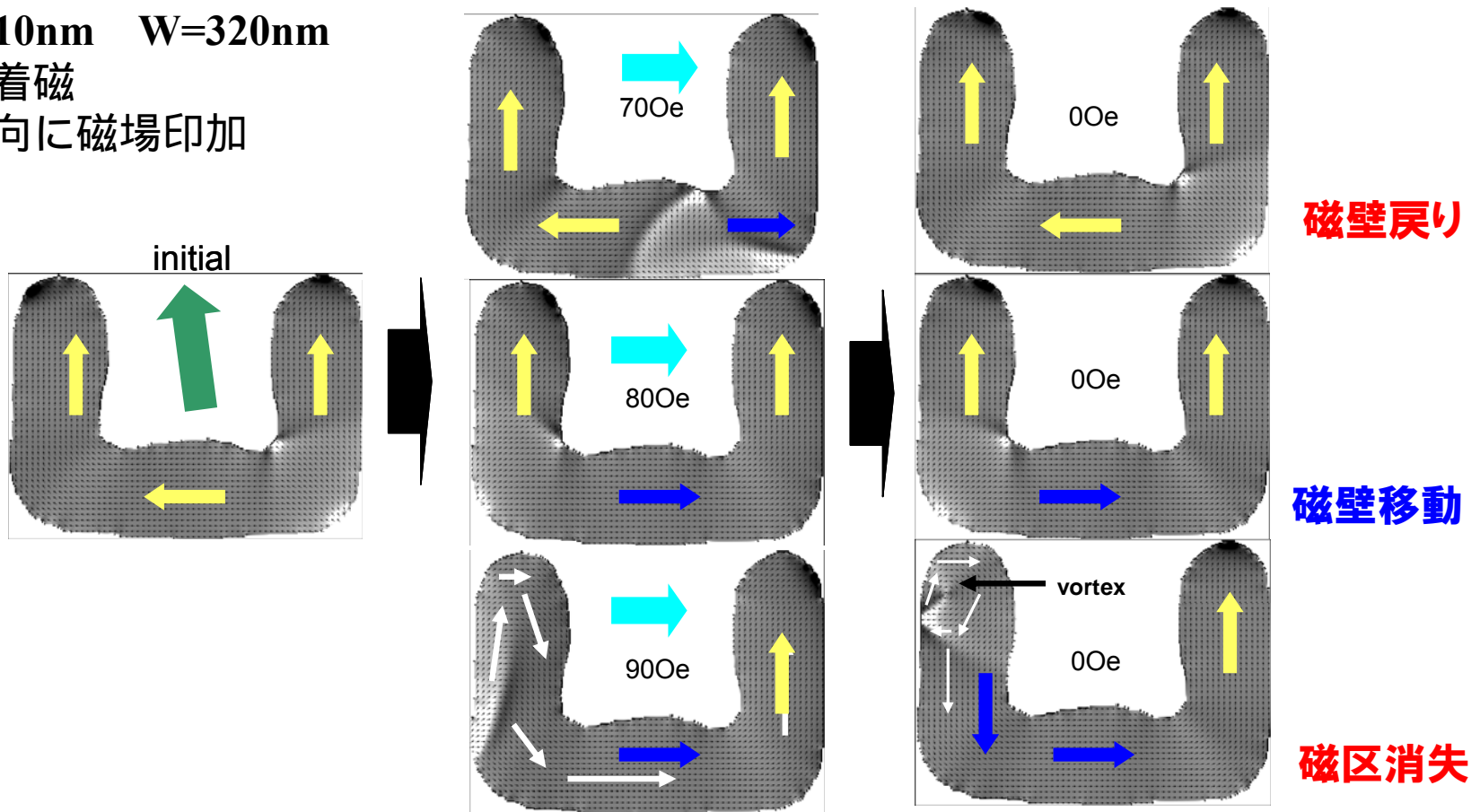
磁壁移動磁場は、電気特性と対応

磁場方向反転にともなう磁化配置変化



U字形形状パターンの磁壁移動シミュレーション

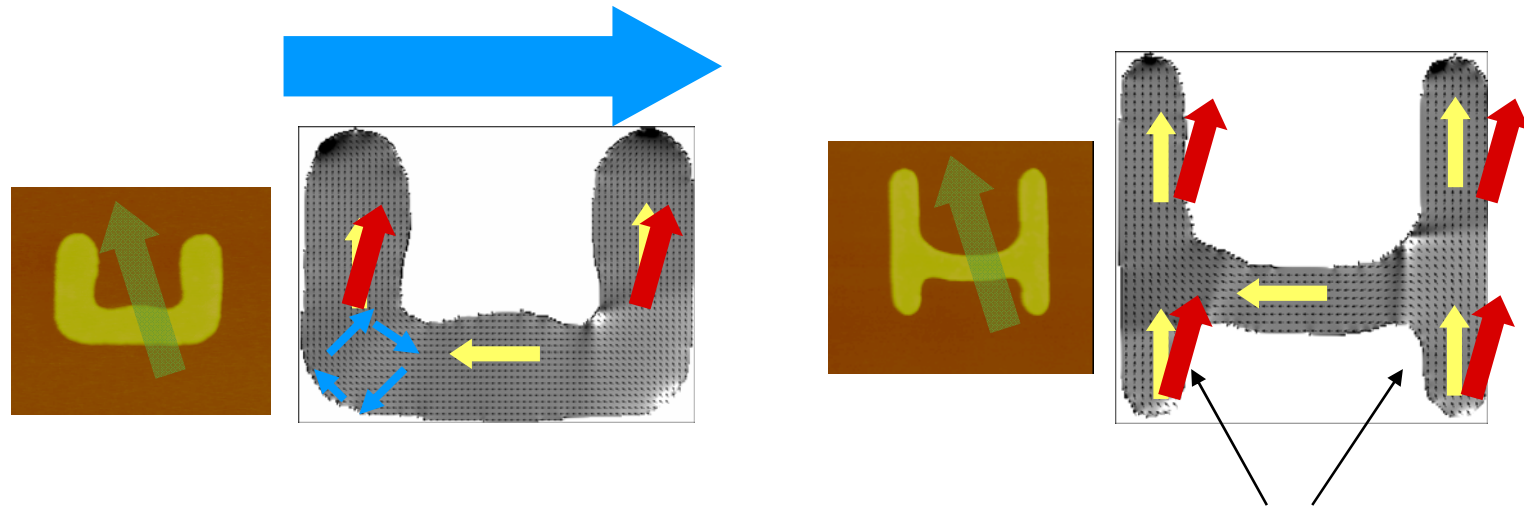
NiFe10nm W=320nm
 10° 着磁
 左方向に磁場印加



磁壁がvortex構造に変化して磁化固定領域まで移動
 → 磁区消失

U字形形状 → 磁化固定領域の異方性弱い → 多様な磁化配置

考察：磁化配置



磁壁移動時の横方向磁場で
磁化固定領域の磁化が傾く
異方性が不十分でトラップサイトに
止まりにくい

磁壁移動時の印加磁場（横方向）
に対して磁化反転抑制
磁化固定領域が磁化反転しづらい

U字形状： 磁化固定領域の異方性弱 → 多様な磁化配置形成
H字形状： 磁化固定領域の強化で磁壁移動均一化

In-situ磁場印加による磁区観察

測定時の擾乱磁場が無いため
外部磁場印加による磁壁移動が観察可能

磁場による磁壁移動

- ✓ トラップサイト間で磁壁移動確認
- ✓ 平均磁壁移動磁界の見積もり
- ✓ 磁壁移動挙動の解析

単一磁壁維持 → 可逆変化

単磁区化 → 不可逆変化

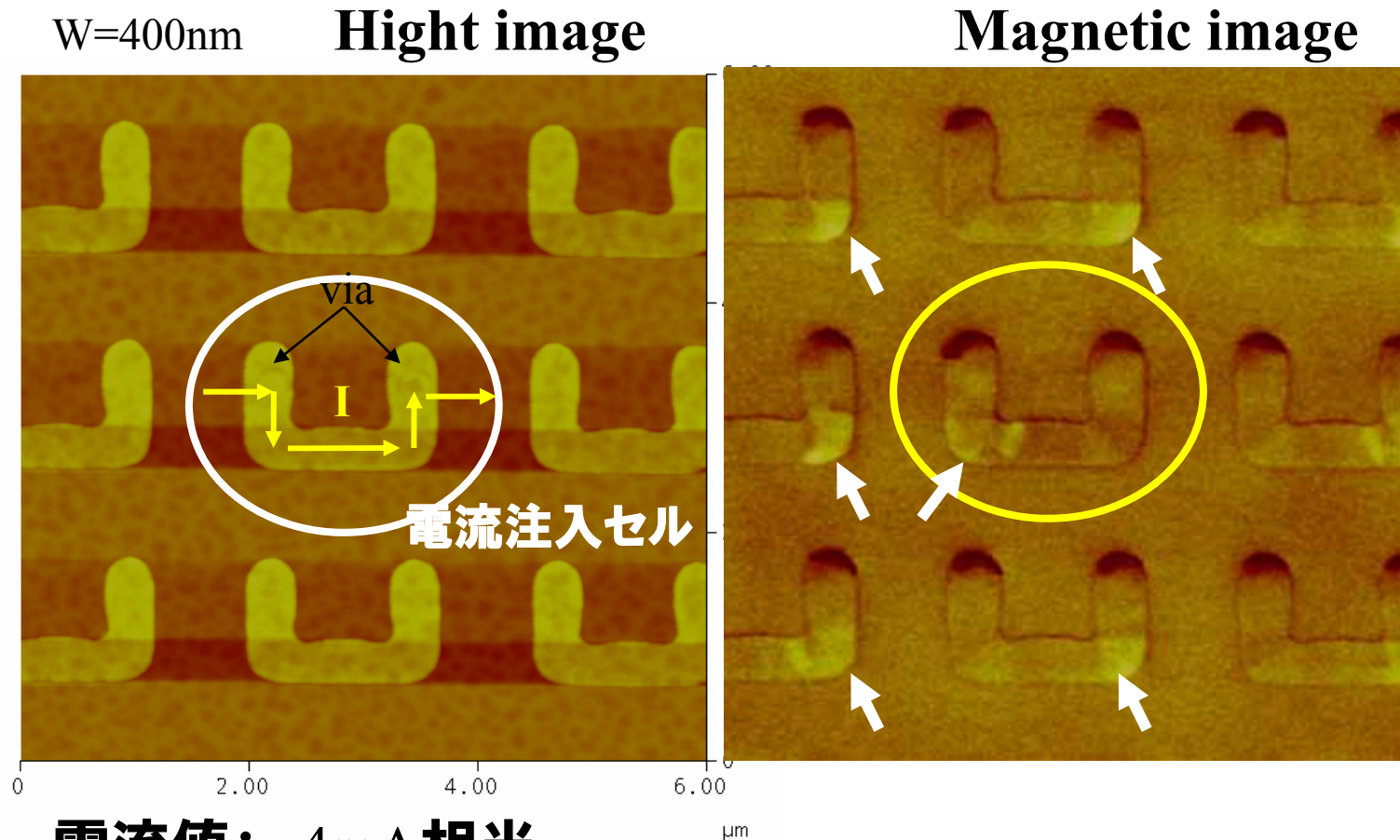
単磁区化は磁化固定層の反転による磁壁消失

途中停止 → 不可逆が多い

磁化固定層の磁気異方性増強 → 磁壁移動の均一化

H字形状が有効

磁壁電流駆動の検証 MFM像



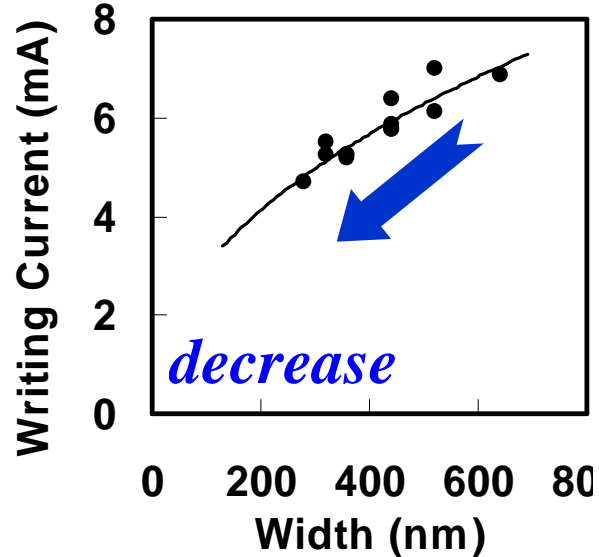
電流値： 4mA相当

電流を通じたパターンのみ磁壁位置が移動

DW Seesawの磁壁移動臨界電流値

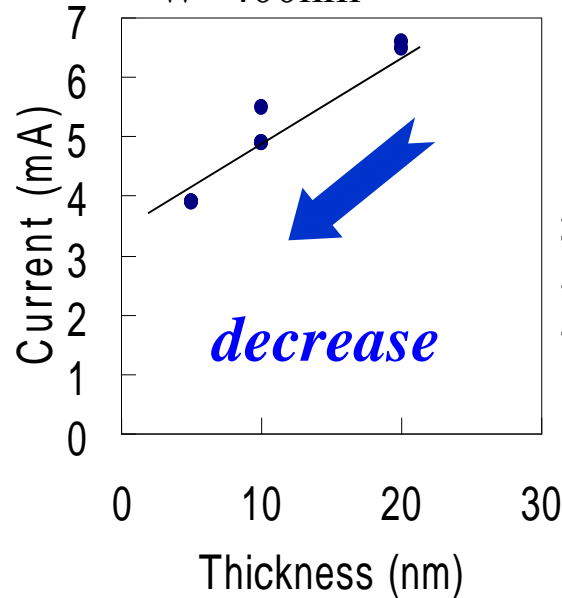
セルサイズ依存性

NiFe 10nm



磁性膜厚依存性

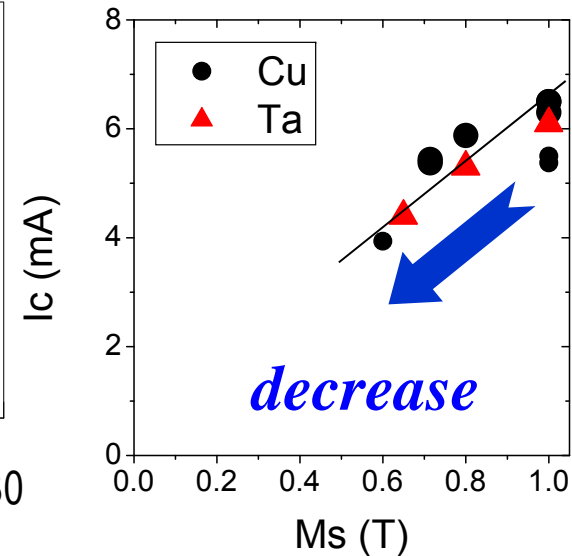
W=400nm



Ms依存性

NiFe 10nm

W= 320nm



線幅、膜厚低減にともなう電流密度増加
形状効果

磁化の低減にともなう
臨界電流密度の減少

線幅、磁性膜厚、磁化で磁壁移動の臨界電流値が低減

高速混載で要求される電流値0.2mA以下にならない

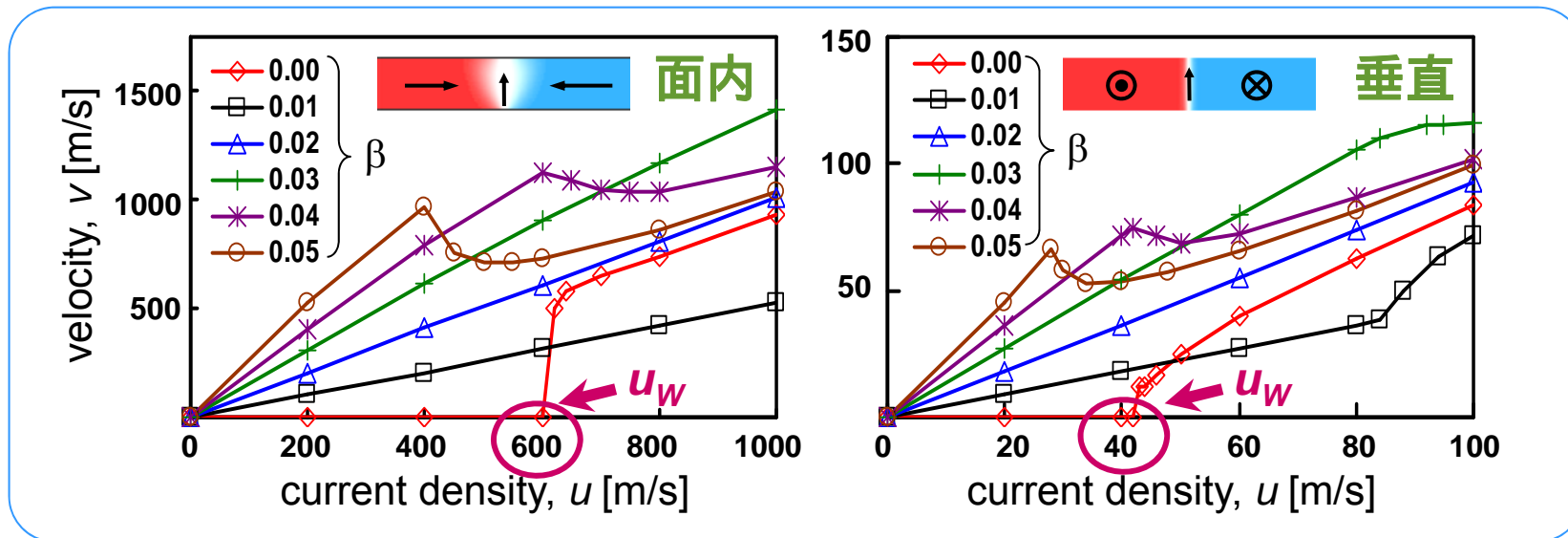
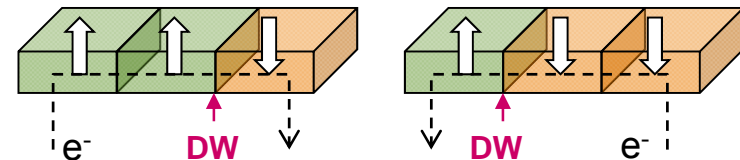
LLGによる磁壁電流駆動シミュレーション

- MRAM requires...
 - Small I_{write} with large H_{th}
- PMA is preferable.

PMA: perpendicular magnetic anisotropy
 IMA: in-plane magnetic anisotropy

DW-motion MRAM

“0-state” ↔ “1-state”



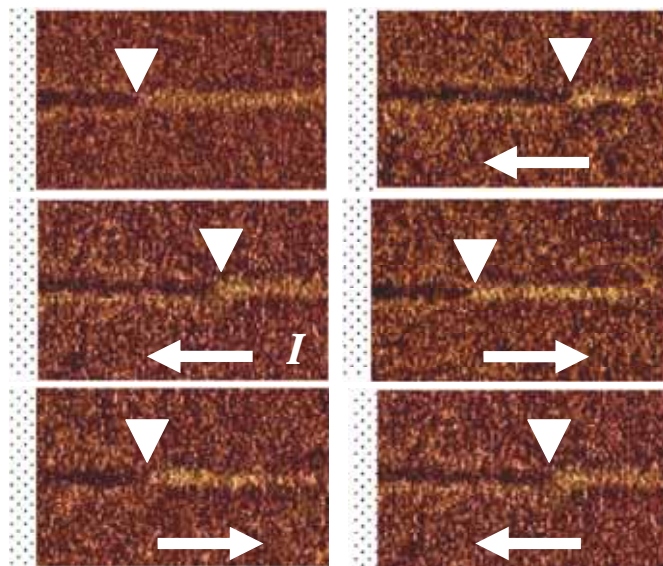
Fukami et al., MMM2007, JAP2008

➤ 垂直磁化方式で低い臨界電流密度

u_w : critical current density for domain wall motion

Co/Ni垂直磁化磁性細線の電流駆動実験

Zigzag細線に形成した磁壁の電流駆動
(MFM観察)

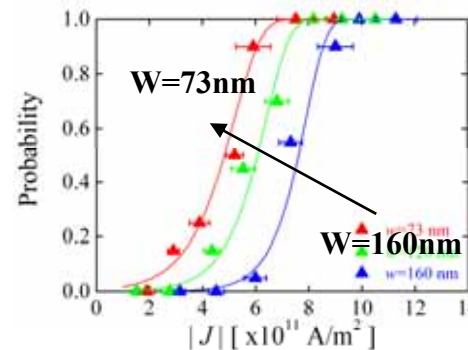
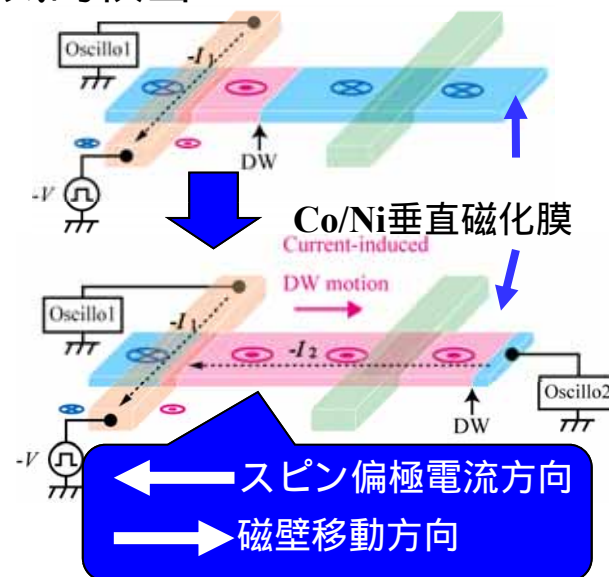


w=90nm

T. Koyama *et al.* Appl. Phys. Express 1 (2008) 101303

Co/Ni垂直磁化膜で再現性の高い
磁壁電流駆動を確認

異常ホール効果を利用した磁壁電流駆動
の電氣的検出

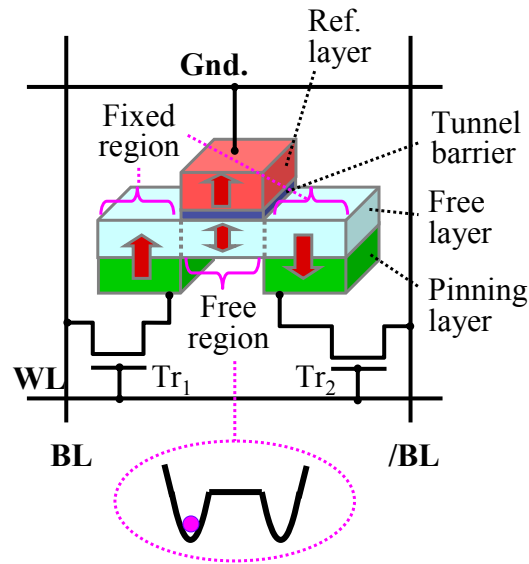


$v \sim 50\text{m/sec}$
 $J_c \sim 8 \times 10^{11} \text{A/m}^2$

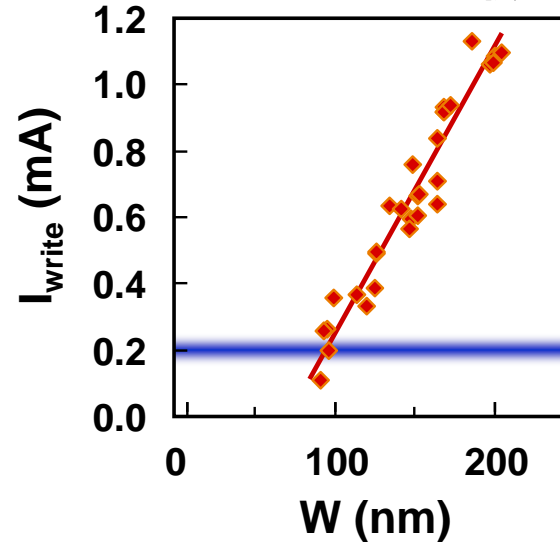
H. Tanigawa *et al.* MMM 2008 AS-16

Co/Ni積層膜を用いた垂直型磁壁移動メモリの書き込み特性

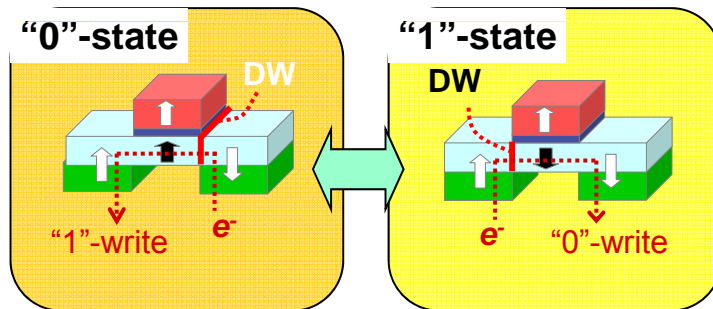
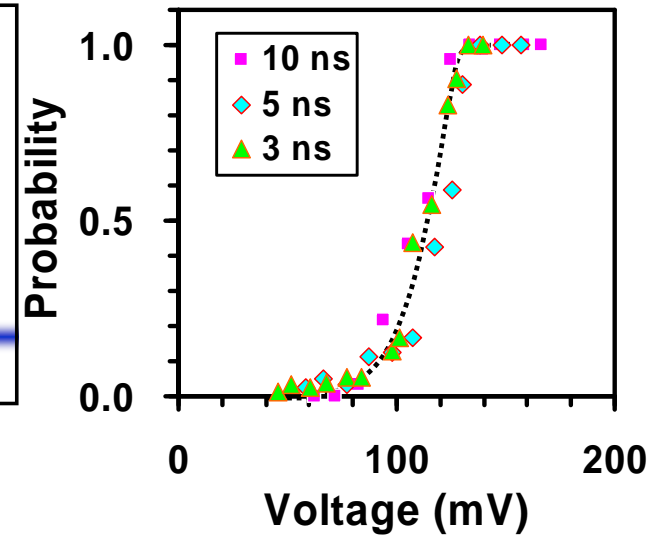
書き込み特性



書き込み電流の線幅依存性



書き込みパルス長依存性



90nm以下の細線で書き込み電流0.2mA以下
磁壁移動速度50m/sec以上 → 200MHz動作

磁壁電流駆動のパルス幅依存性測定

膜構成:

Pt(1.6)/[Co(0.3)/Ni(0.9)]₄/Co(0.3)/Pt(1.6)/Ta(3)//Si sub.

細線パターン: Co/Ni単一細線と電極

Co/Ni w=150nm、L=7.0 μ m Au through line 500nm
Ta Hall bar 200nm

電流パルス印加条件

磁壁導入: 4V、10nsec

磁壁電流駆動:

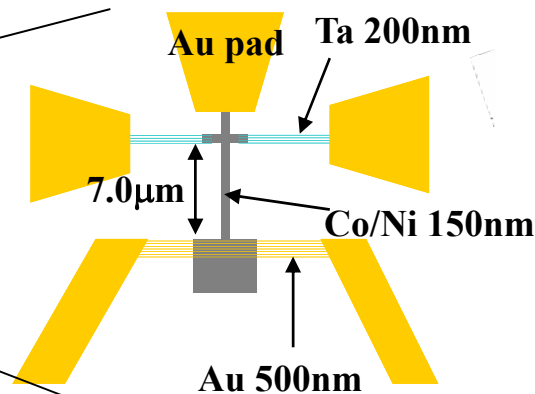
電流密度: 1.4×10^{12} A/m²

パルス幅: 20- 40 nsec

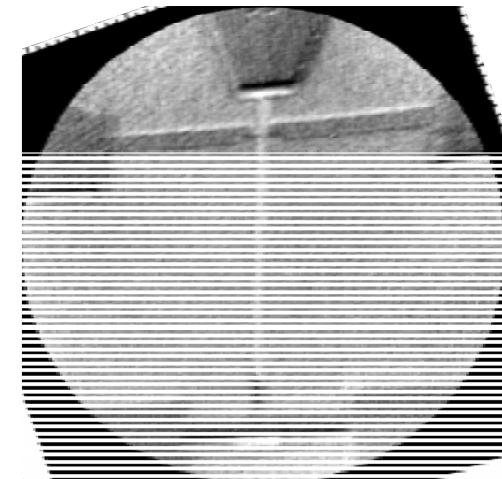
観察

SPELEEM (SPring-8 BL17SU)

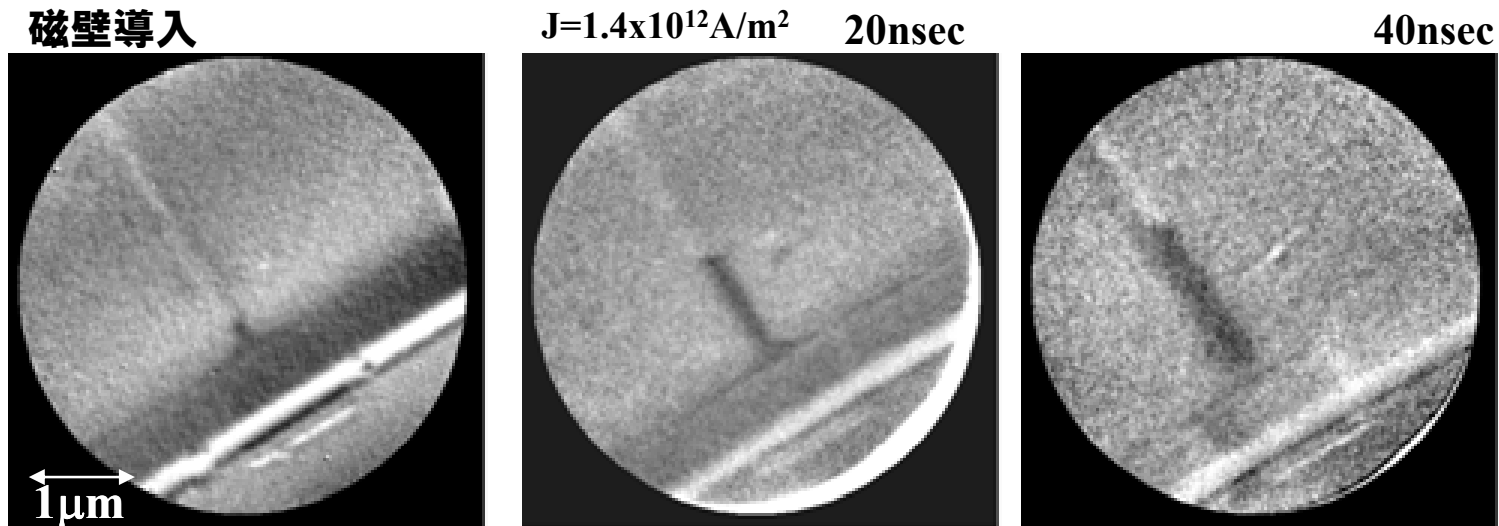
Co-LIII 780eV



SPELEEM像



磁壁移動速度の定量化（現在 検討中）



1. 電流磁場で導入された磁壁位置の確認
Au線から約200nmの位置に磁壁形成
2. 磁壁位置の電流密度、パルス幅依存性
電流で磁壁が移動 パルス幅とともに磁壁位置が変化

まとめ

磁壁移動メモリセル用途を検討しているサブミクロン磁性パターンの磁化配置をXMCD-PEEMで観察

◆ 磁化配置の決定

- ・ 着磁から予想される磁化配置を確認
→ LLGシミュレーションとも対応

◆ PEEM装置内磁場印加で磁場による磁壁移動確認

- ・ トラップサイト間可逆磁壁移動
- ・ 平均磁壁移動磁界の見積もり
- ・ 磁壁移動パターンの解析で形状改良指針
→ 磁化固定層の形状異方性増強 H字形状が有効

◆ 垂直磁化細線の磁壁電流駆動観察

- ・ 線幅100nm以上のCo/Ni垂直磁化細線で磁壁電流駆動を確認

磁場フリーの高分解能磁区構造観察

- 磁壁移動メモリの動作検証、性能向上に有効な手法

今後の課題（希望）

1. **スピン電流による磁壁電流駆動現象のリアルタイム観察**
 - XMCD-PEEM、SPELEEMに電極端子を導入
 - その場電流印加による磁壁移動過程観察
 - 放射光と同期させたダイナミクス観察
 - X線フーリエ変換ホログラフィの可能性検討
2. **MRAMデバイスパターンでの磁化配置観察**
多数素子の磁化状態を一括観察
MRAM動作検証、誤動作素子の動作解析などに適用

RENESAS

ルネサス エレクトロニクス株式会社

© 2010 Renesas Electronics Corporation. All rights reserved.