

XMCD-PEEMを用いた 磁壁移動型メモリ用サブミクロン 磁性パターンの磁区観察

NECデバイスプラットフォーム研究所

大嶋則和

共同研究者

NEC:

沼田秀昭、深見俊輔、永原聖万、鈴木哲広、五十嵐忠二、石綿延行

SPring-8:

福本恵紀、木下豊彦

謝辞

本研究はSPring-8 2006B期戦略活用課題および
2007A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。

また、本研究は以下の皆さまのご協力を得ています。
ここに感謝します。

XMCD-PEEM観察:

JASRI/SPring-8 木下豊彦氏、福本恵紀氏、中村哲也氏、渡辺義夫氏

磁壁移動メモリの研究

京大化研 小野輝男教授、葛西伸哉氏、電気通信大 仲谷栄伸教授

SPring-8実験のてびき

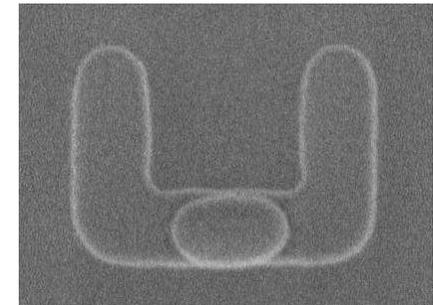
JST(元NEC)泉弘一氏、NEC 中田正文氏

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・解析し、メモリセル形状の最適化指針を得る。

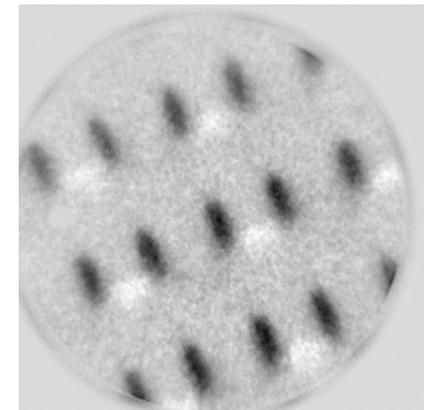
磁壁移動メモリ記録セル用サブミクロン磁性パターンの磁化配置、磁壁移動の観察

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



プローブ磁場影響なく実デバイスに近いパターンで観察できる方式

磁気円二色性XMCD-光電子顕微鏡PEEM



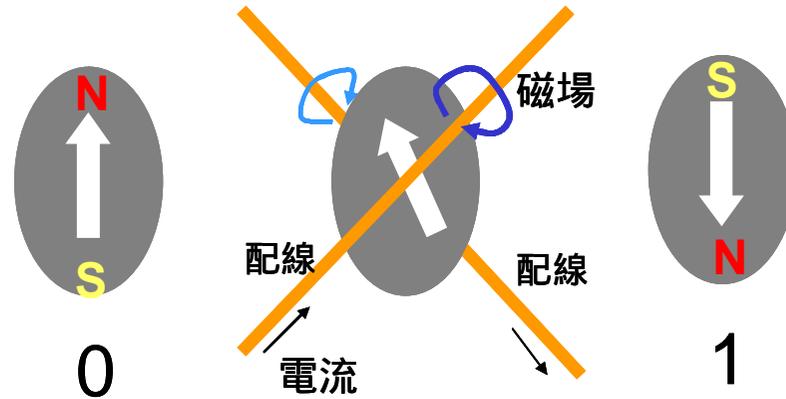
Outline

- 背景： MRAMについて
- 磁壁移動のメモリ応用
- XMCD-PEEM観察
 - 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
- 課題とまとめ

MRAM

(Magneto-resistive Random Access Memory)

磁化方向を記録情報(0,1)とするメモリ



- ・小さな磁石の向きを磁場で反転して情報を記録
- ・磁気抵抗効果を利用して読み出し

特徴:

不揮発

高速

繰り返し耐性

磁化方向で記録 電力供給が無くても維持される

磁化反転はナノ秒オーダー

磁化方向は何度変えても劣化しない

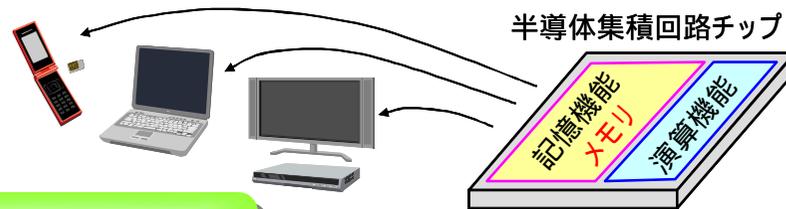
MRAMの可能性

不揮発、低消費電力、高速なメモリ

電源OFFしてもRAMに情報が残って高速に書きかえ

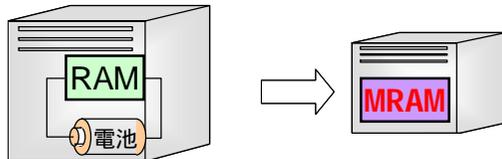
快適

瞬時に立上げ(PC、DVDレコーダ、NAVI)



省エネ

データ保持用の電力が不要

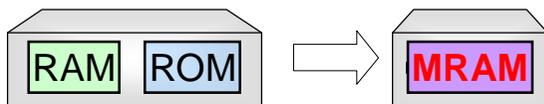


(例) 携帯機器が時間使用が長くなる (待機時電力「ゼロ」)

省部品

RAM、ROMの使い分け不要

用途に適したプログラミングも可能

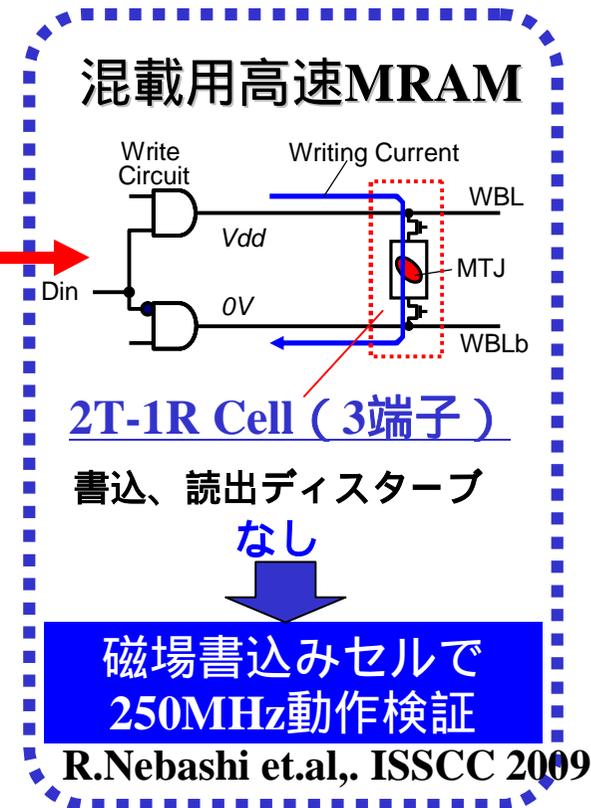
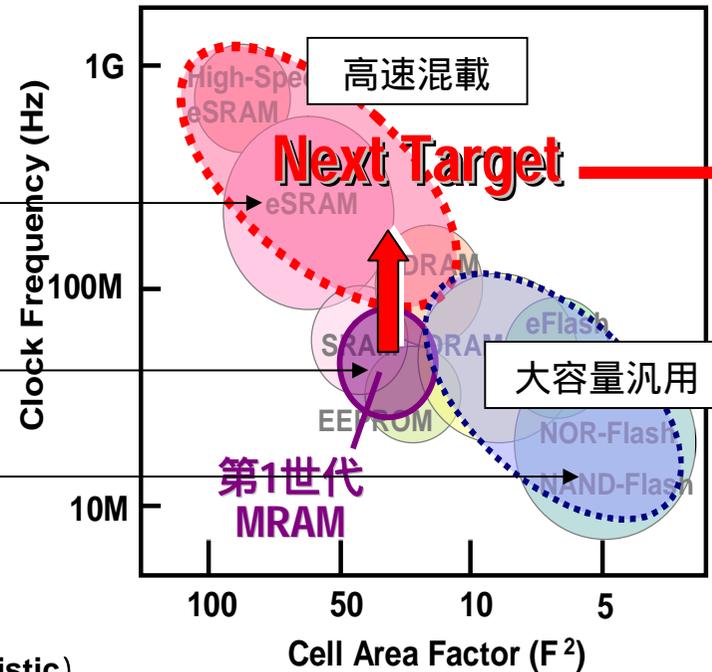


MRAM開発

- ✓ 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	25.6
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

スケーラブルなセルの検討

大容量化（微細化）とともに低消費電力で高速動作にしたい

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）

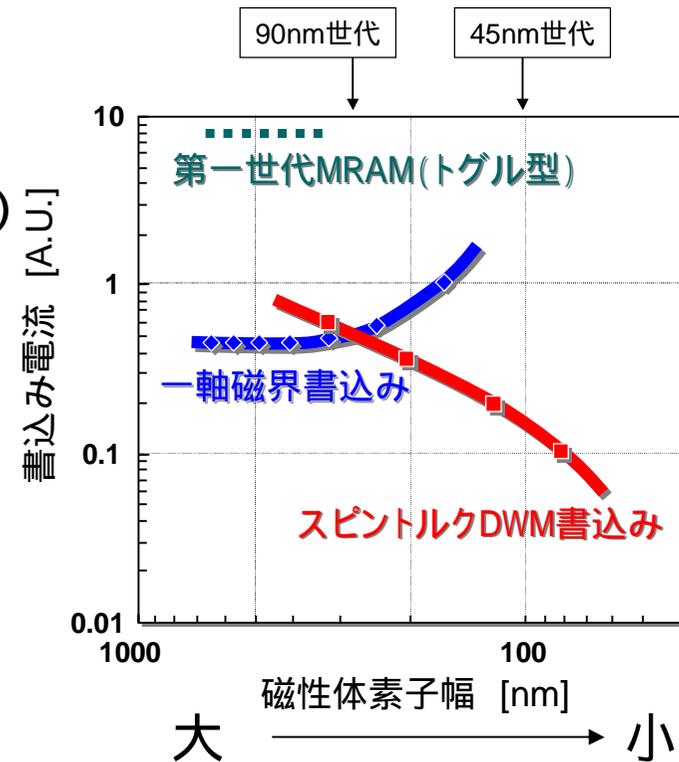
スピントルク書き込みMRAM:

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

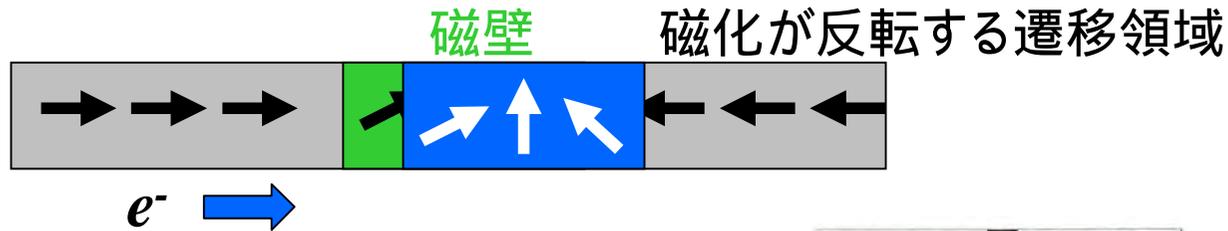
- ✓ スピン注入磁化反転
- ✓ 磁壁電流駆動

2Tr-1MTJ 構造 適用には磁壁移動型が容易（有利）



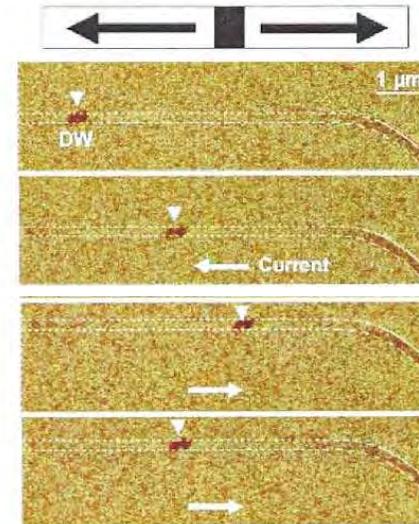
磁壁移動メモリ

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)

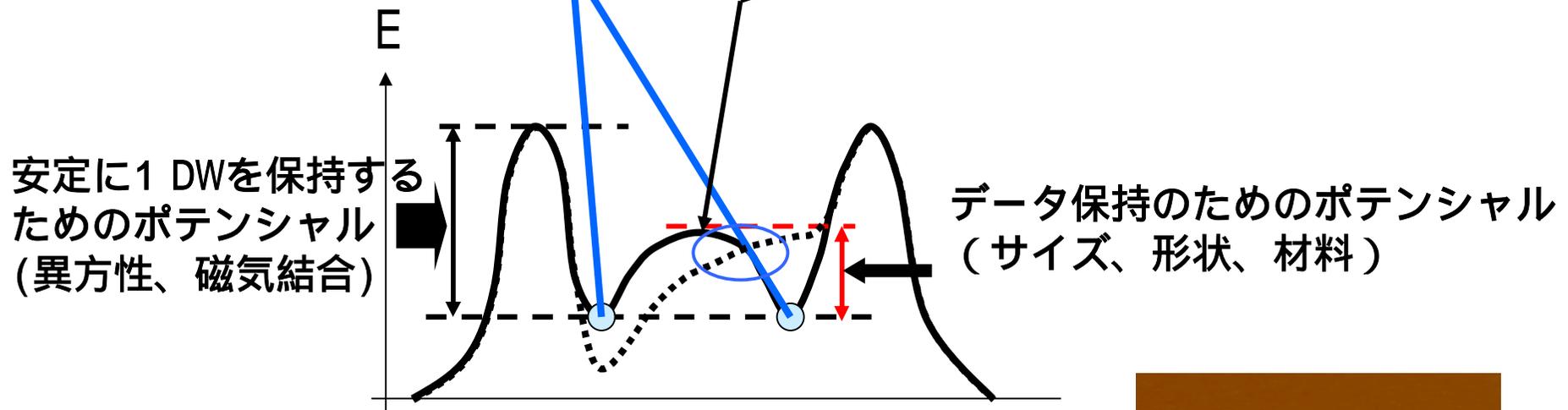
高速、高密度メモリに好適

メモリにするには

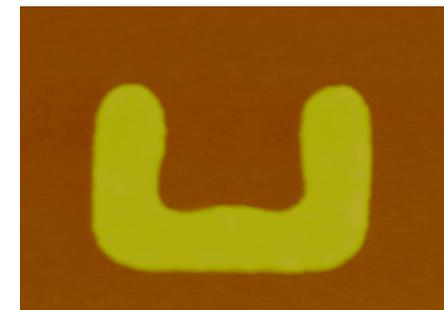
素子の中に2つのDWトラップサイト
磁壁を移動させて記録状態を形成

どちらか一方にDWの存在
することが、安定状態。

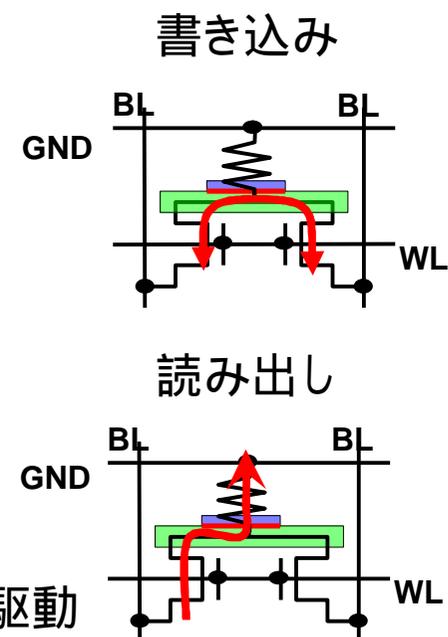
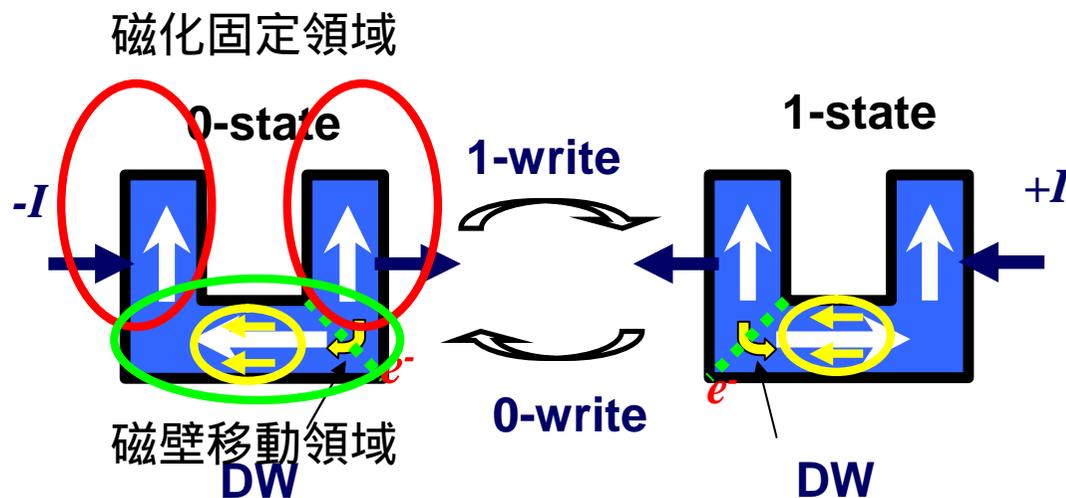
途中で準安定な状態
(DWの引っかかり等)が無い



簡単に満たす形状
U字形状パターン



磁壁移動メモリ Domain Wall Seesaw



- “U” shaped cell中に単一磁壁を形成し電流でDWを動作
- 2本の腕部分がspin源 Spin偏極電流でDWを駆動
- MTJの磁気抵抗でデータを検出
- 2個のトランジスタで駆動 高速化対応

■ スピン偏極電流によるデータ書き込み

- 書き込み電流と速度は微細化とともにスケールリング

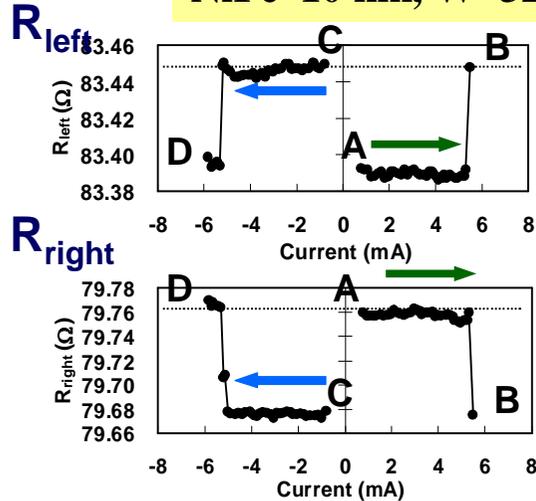
■ 書き込み電流パスと読み出し電流パスが別経路

- 読み出し時の誤書き込みなく、バリアダメージ軽減

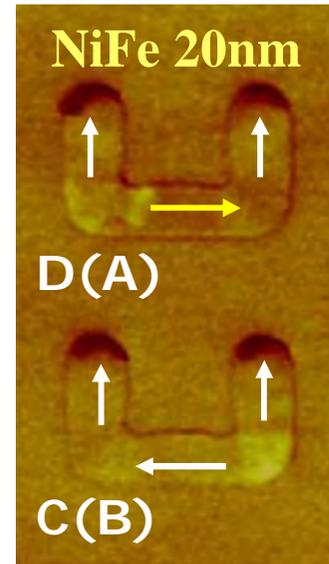
NiFe/U字形形状パターンによる原理動作

磁壁電流駆動(書込)

NiFe 10 nm, W=320 nm

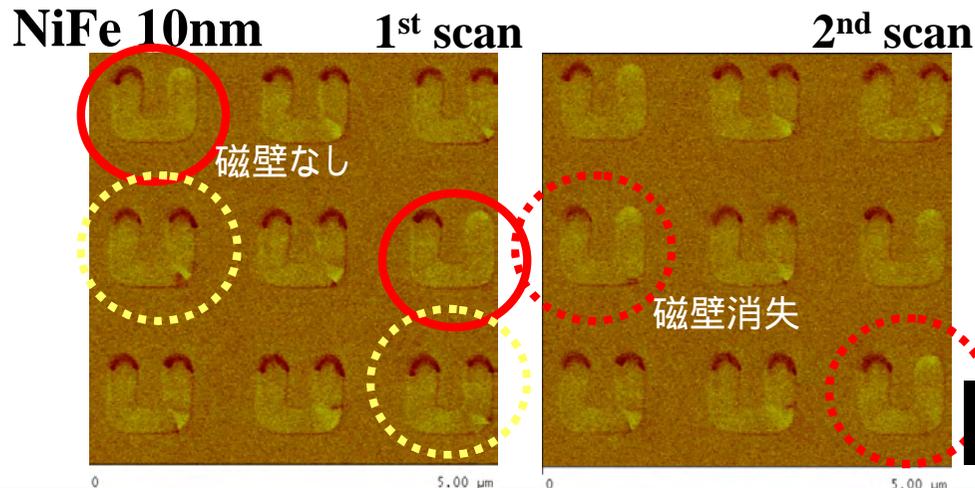


Current density $\sim 1.2 \times 10^{12}$ A/m²



電気評価 / MFM像で
磁壁移動を確認

H. Numata *et al.*,
Tech. Digest of Symposium on VLSI technology 2007, 232.



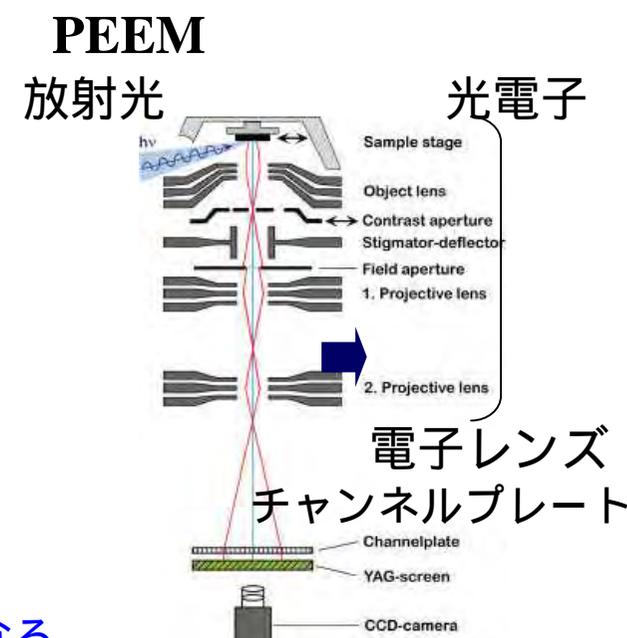
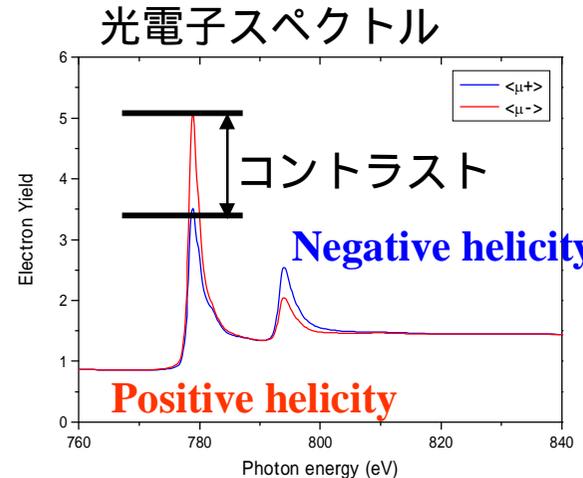
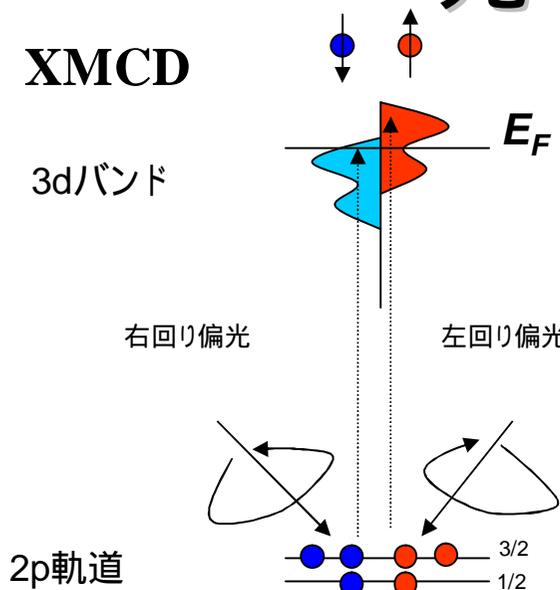
探針磁場による磁区構造変化
磁場 / 電流による磁壁移動と
区別がつかない。

観察時の磁場擾乱がない手法が必要

XMCD-PEEMによる磁化配置観察

U字形状磁性パターンの磁化配置はみえるか？
シミュレーション予測と対応するか？

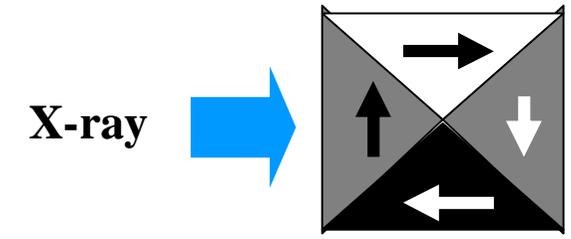
X線磁気円二色性(XMCD) 光電子顕微鏡(PEEM)



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

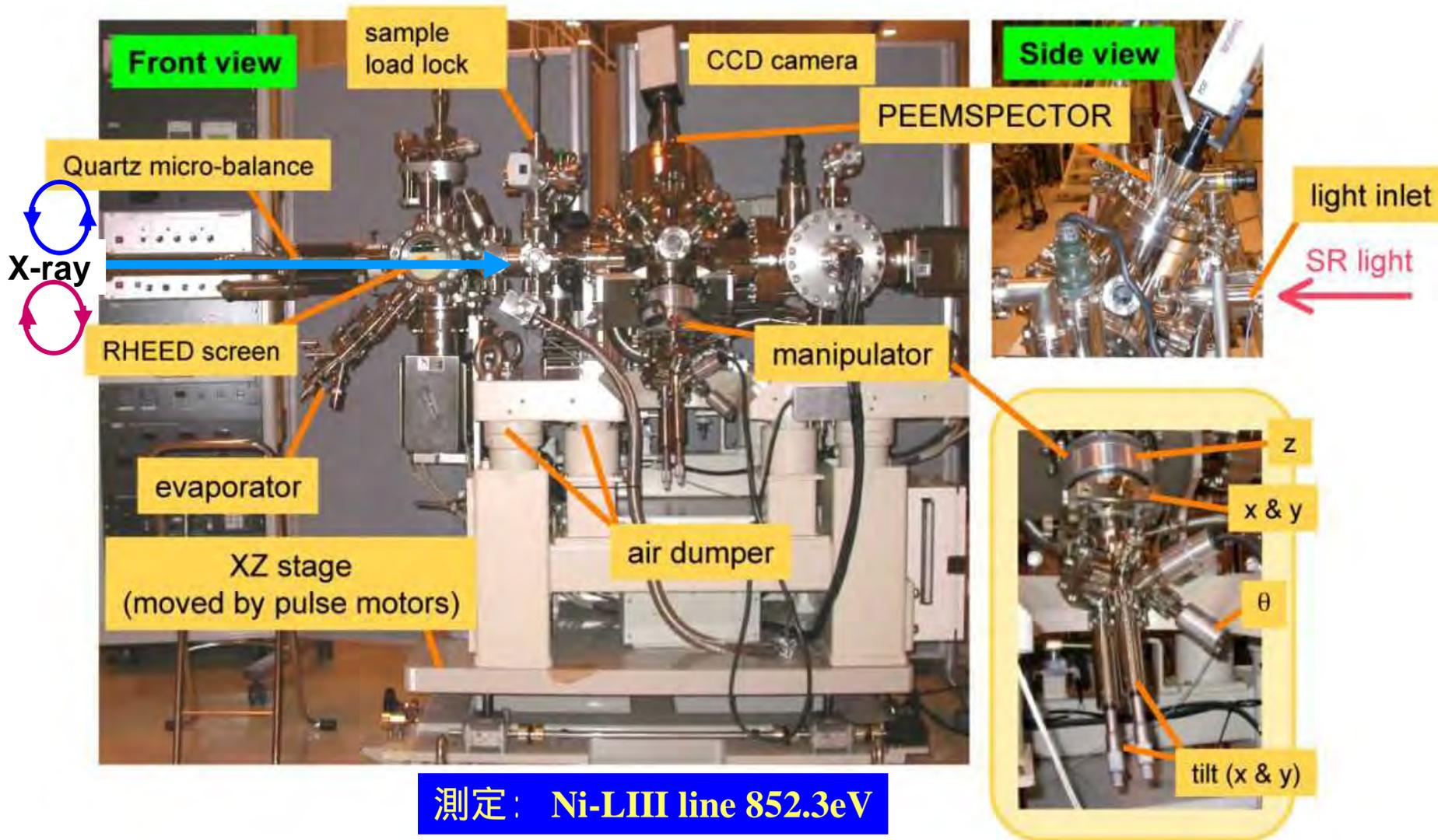


試料への磁場影響なく高分解能な磁区観察が可能
装置内で磁場印加すれば磁化配置変化が見える

分解能 ~ 100nm
元素選択性

PEEMSPECTOR概観

Elmitec社製 SPring-8, BL25SU設置



SPring - 8のWebsiteより

試料

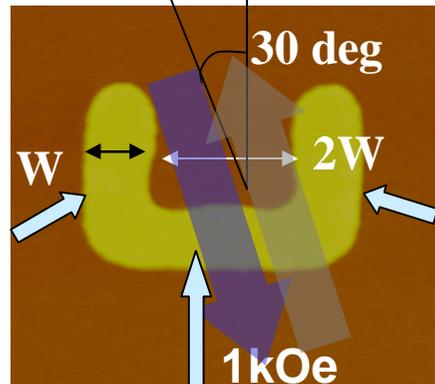
パターン形状

着磁

1.0kOe、60sec、傾斜30°

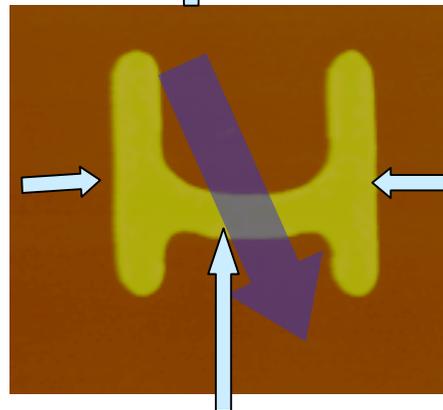
U字形状

磁化固定領域



H字形状

磁化固定領域



磁壁移動領域

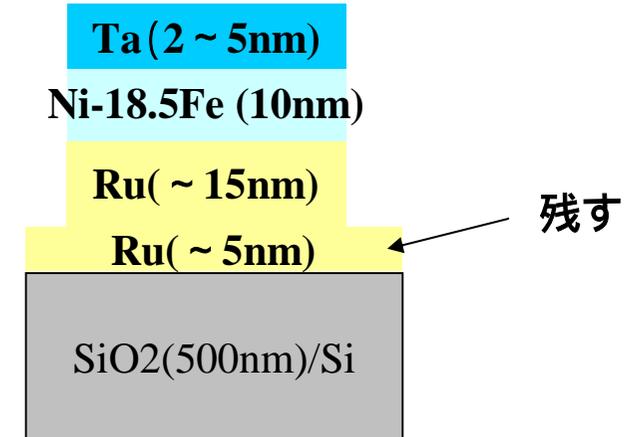
磁性膜構成

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



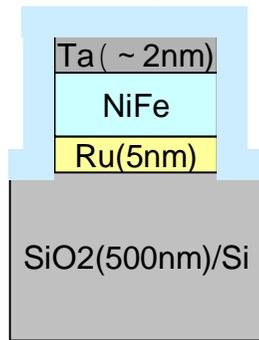
磁壁導入状態と磁場印加による磁壁移動過程の観察

観察試料の作製検討

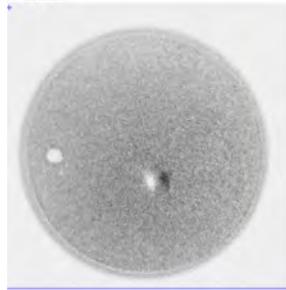
帯電防止：下地Ruを残してパターン化
光電子の効率的な脱出： Taキャップ層薄層化と表面エッチング

予備検討試料

Charge up防止cap層
Ta(3)、Al(3)

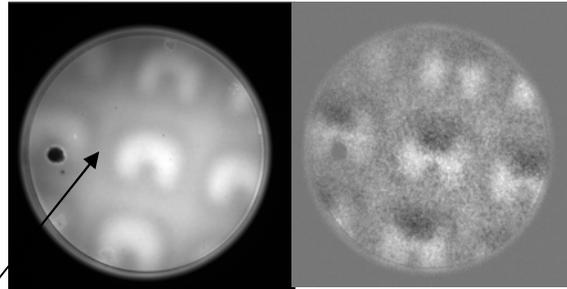


Taキャップ



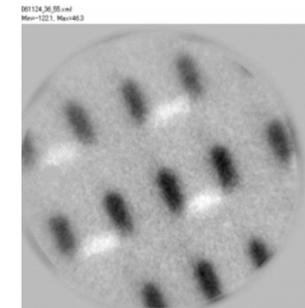
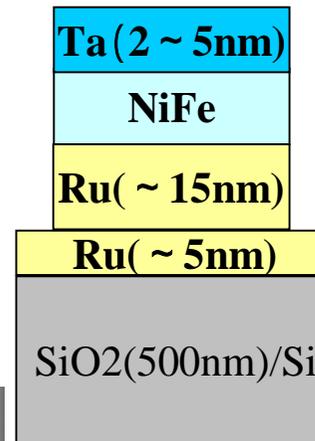
XASが弱く微小パターン観察困難

Alキャップ



チャージアップによる縁取で磁区像不明確
Alで側壁が十分被覆されずcharge up?

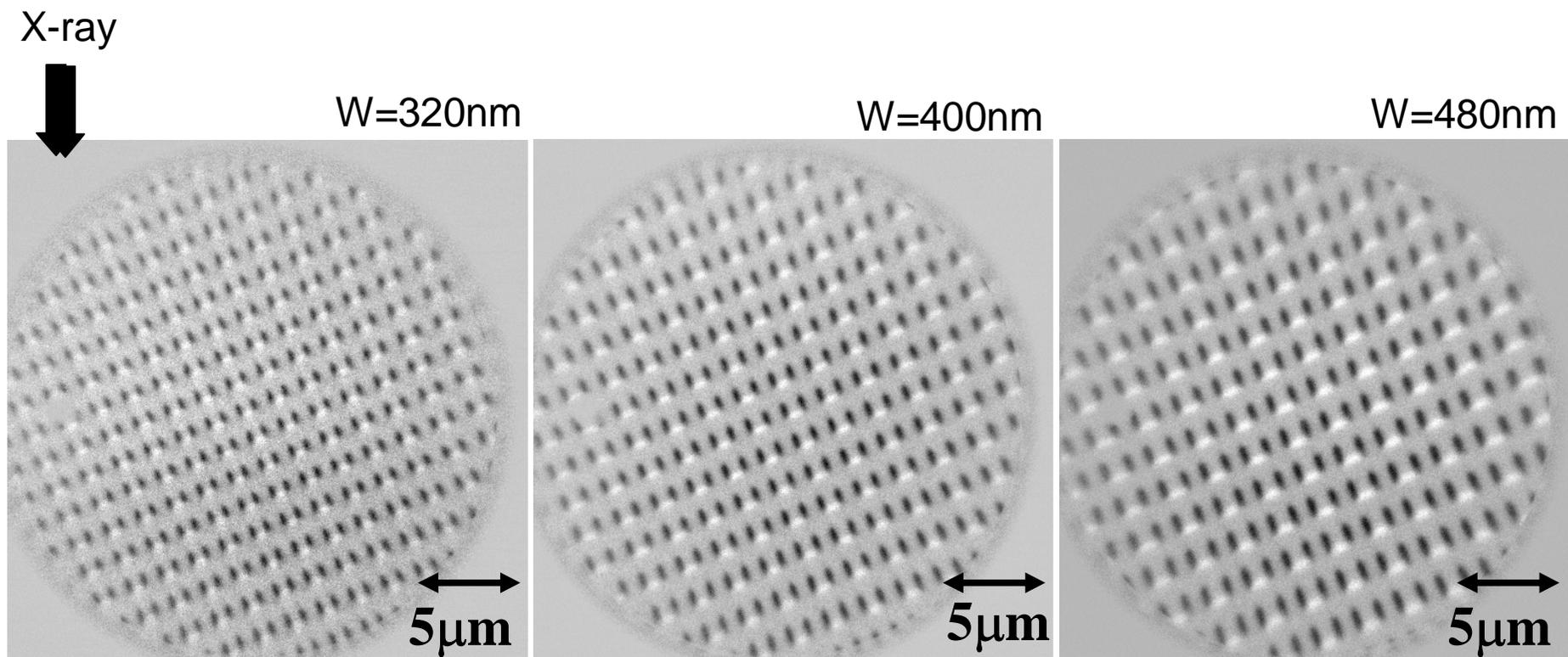
観察試料の断面構造



よく見える!

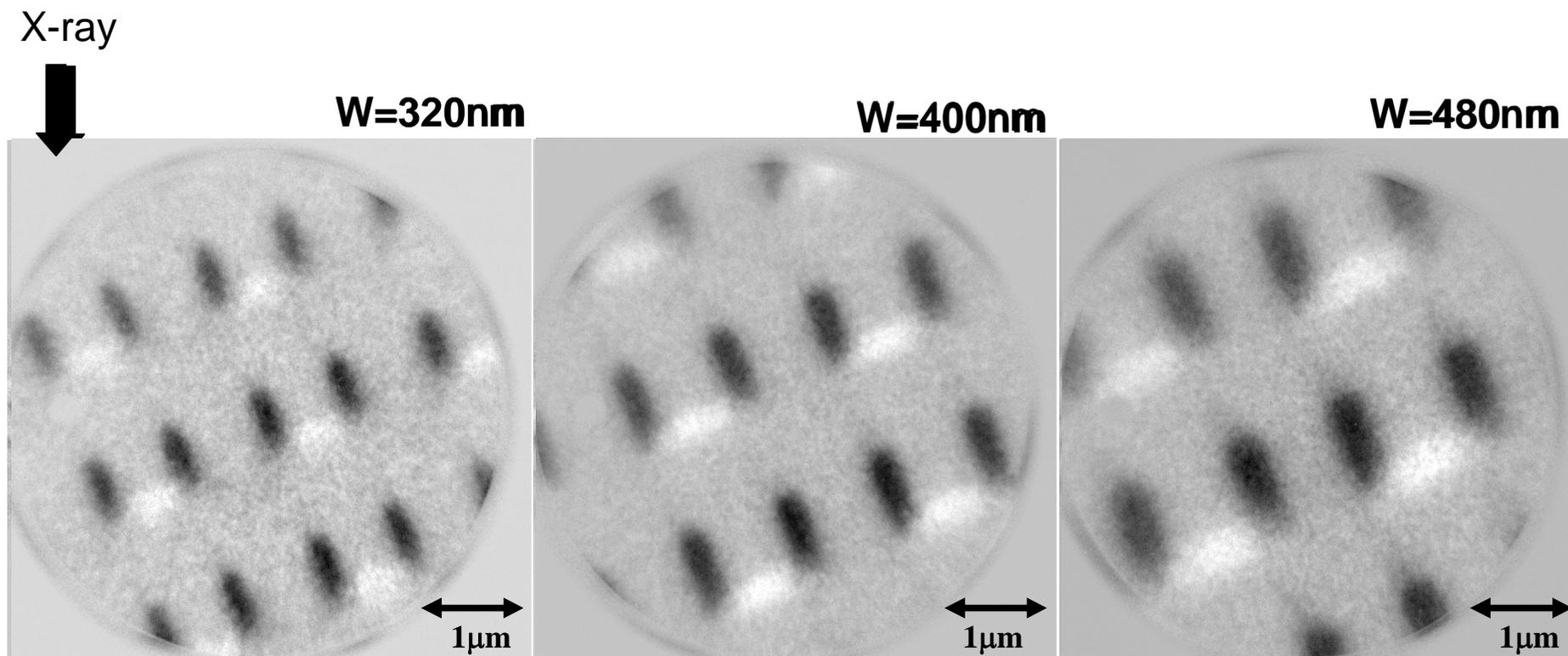
それらしい像はあるのだが...

U字形形状パターンの磁区イメージ



広範囲で一様な磁区を形成

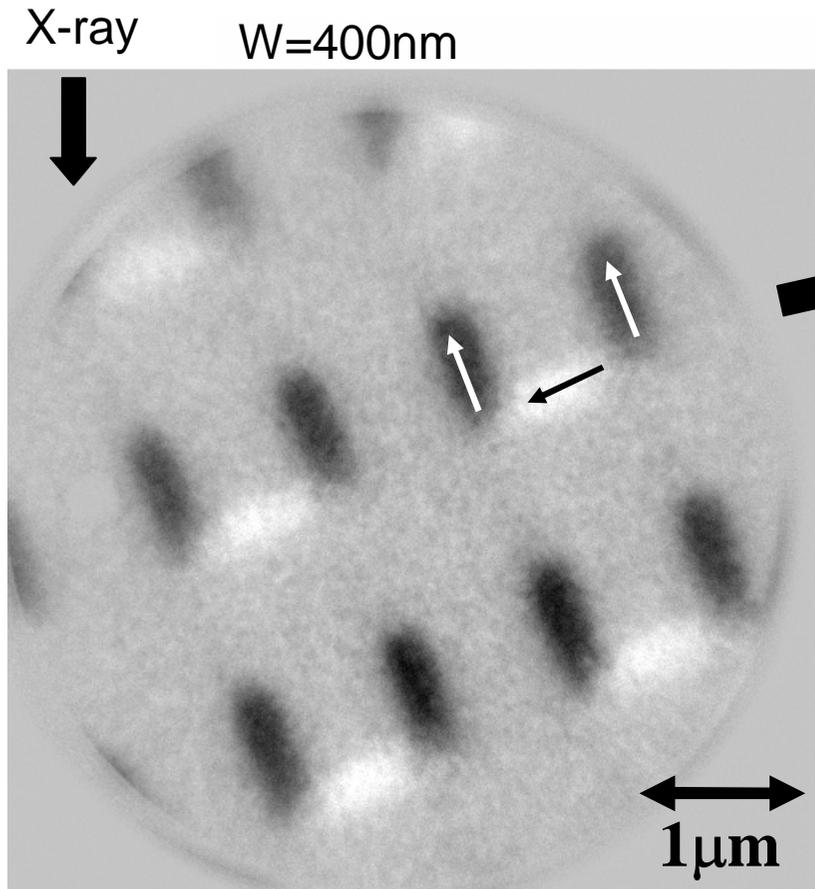
U字形形状パターンの磁区イメージ



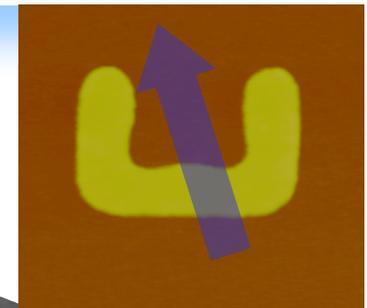
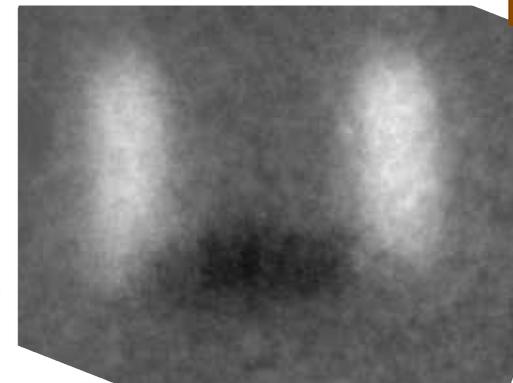
広範囲で一様な磁区を形成

W=320nmまで磁化配置が明確にわかる

磁区構造の解析



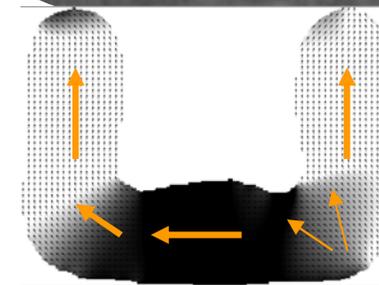
白黒反転



PEEM像

計算結果

OOMMF



TW

LLG simulation による着磁状態の計算結果から
Transverse Wallを形成していることが予測される

X線入射方向と磁化の関係から

- ・ 磁化固定領域(側面) 上向き
 - ・ 磁壁移動領域(底面) 左向き
- 右端にTail-Tailの磁区を形成

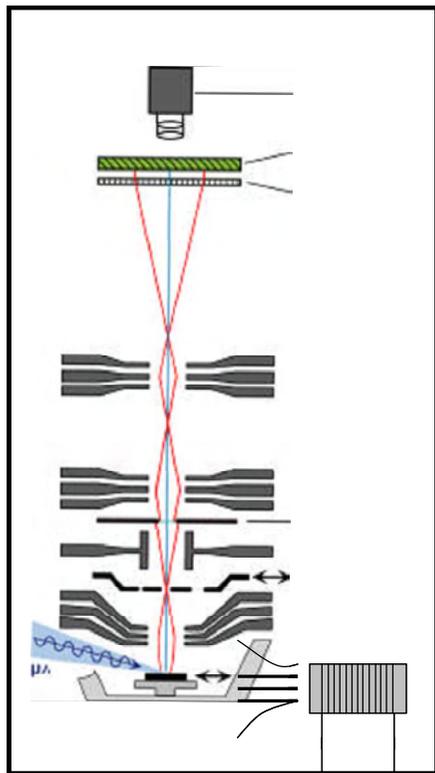
所望の磁化配置
DWMメモリ動作に好都合な磁区構造

U字形パターンに磁壁導入 磁区観察

結果

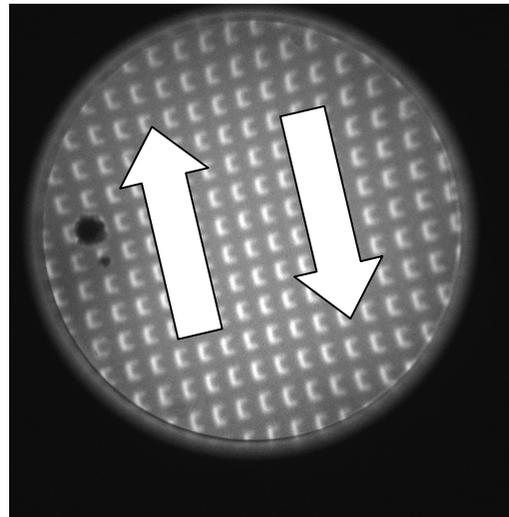
- ✓ 高分解能磁区観察
線幅320nmまで磁化配置が明確
- ✓ 磁化方向、磁区構造（ Transverse構造 ）決定
LLGシミュレーションと対応
- ✓ U字形パターン磁区構造
広範囲で一様になることを確認

PEEM装置内磁場印加による 磁壁移動観察



パルス電源

070703_005_image_sub.xml
Min=-248, Max=4650



磁場印加:

PEEM装置内に鉄心コイルを導入

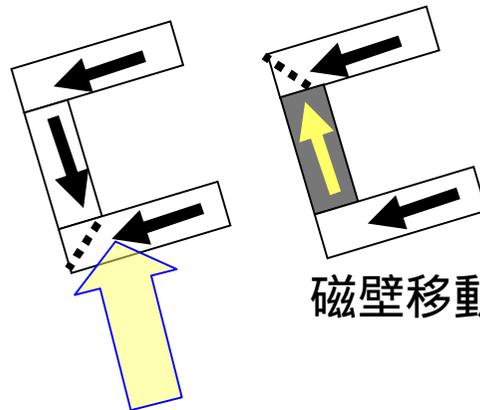
Max 100Oeの磁場

磁場印加時間 約1msec

磁場印加方向

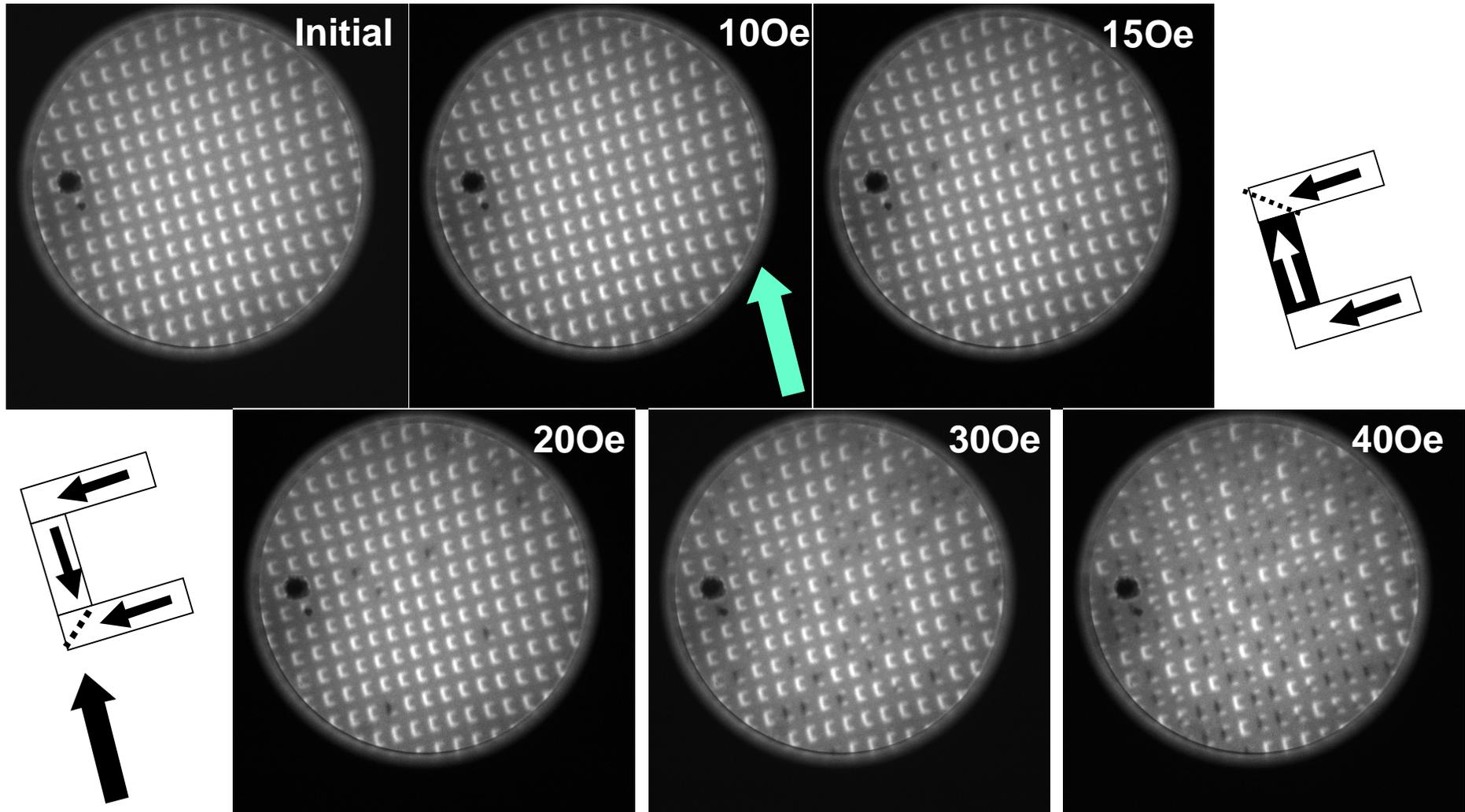
磁壁移動領域に平行方向

試料を回転して調整



磁壁移動

磁区構造の磁場依存性

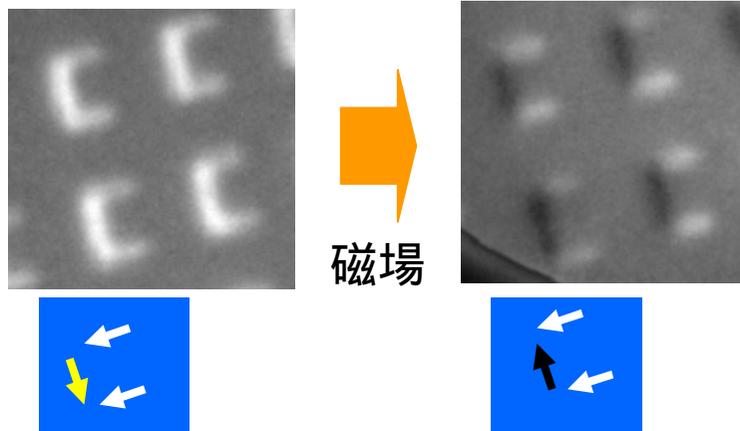


磁場印加により磁壁移動領域の磁化が反転

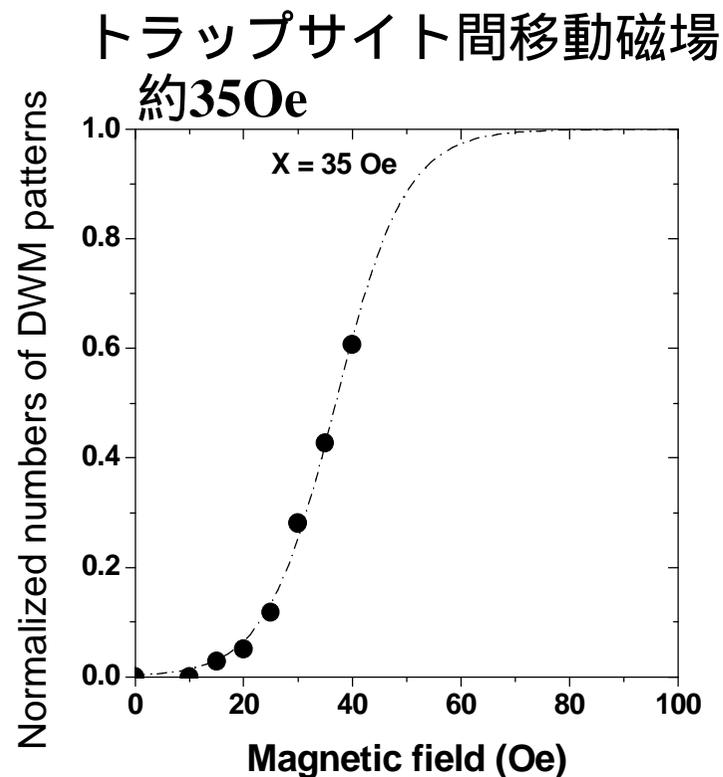
磁壁移動の確認

平均磁壁移動磁界の見積もり

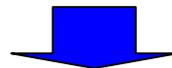
W=320nm, NiFe10nm



変化した個数を数える

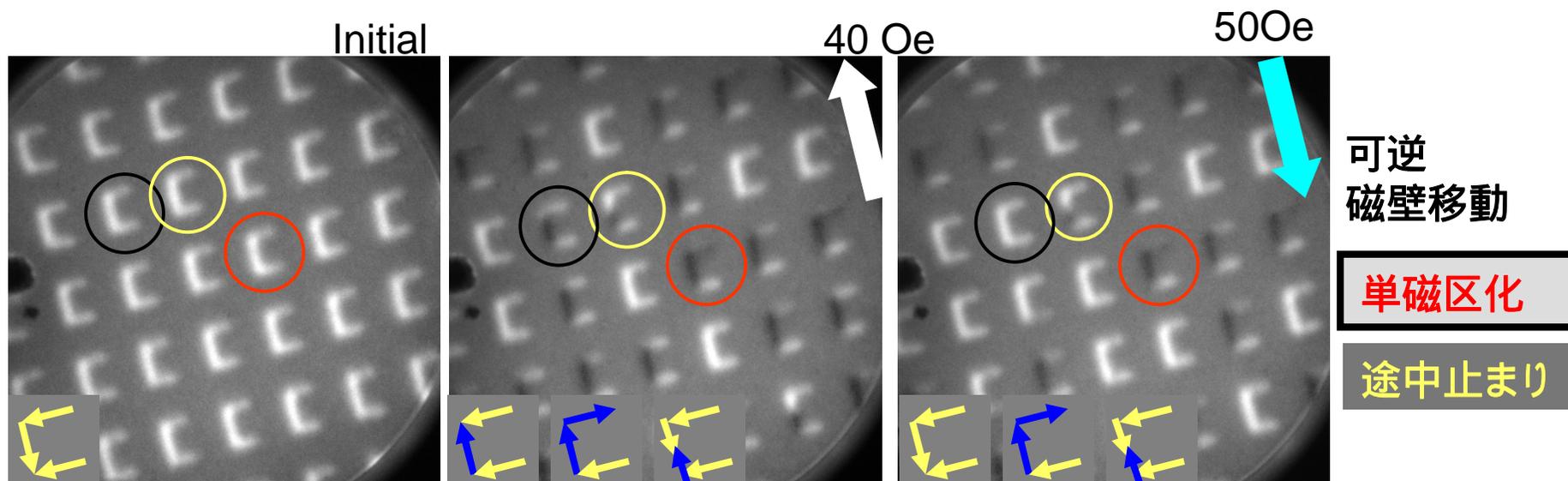


電気抵抗測定による磁壁移動磁場(~ 30Oe)とほぼ対応



磁化測定では評価困難なデバイス構造での磁化過程評価

磁場方向反転による磁化配置変化



トラップサイト間移動 可逆変化

単磁区化 それ以上変化しない： 発生頻度が高い

途中止まり 戻ったり戻らなかったり

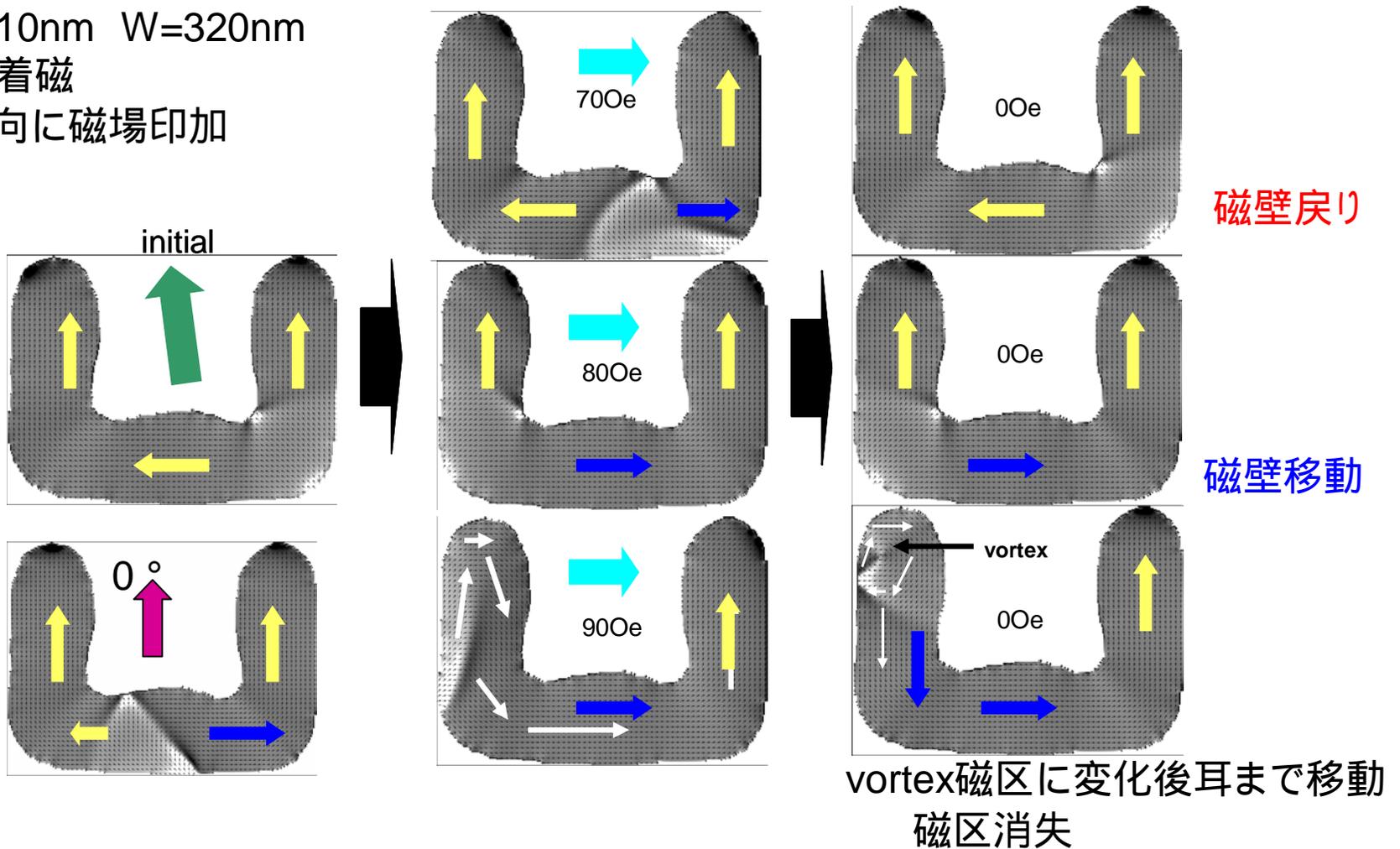
U字形状内の磁壁： 2端間を安定に移動していない

磁壁が磁化固定層を通り抜けて消える

形状異方性が弱い

U字形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



U字形状

磁化固定領域の異方性弱

多様な磁区

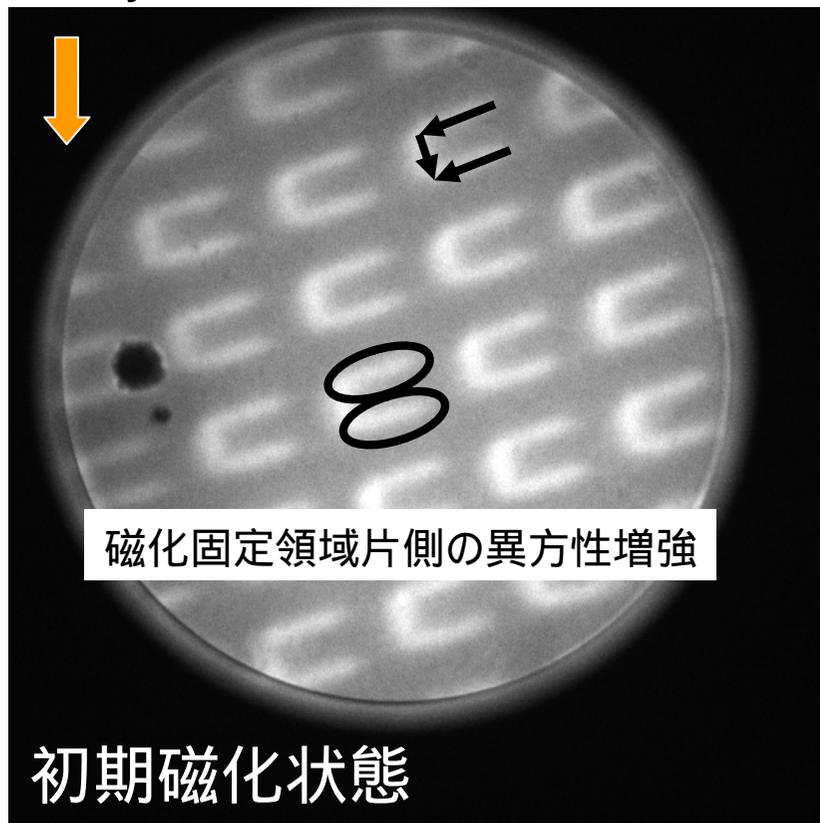
形状異方性を増強した磁気パターン

磁壁を安定にトラップ

U字形状の磁化固定部分の形状磁気異方性増強

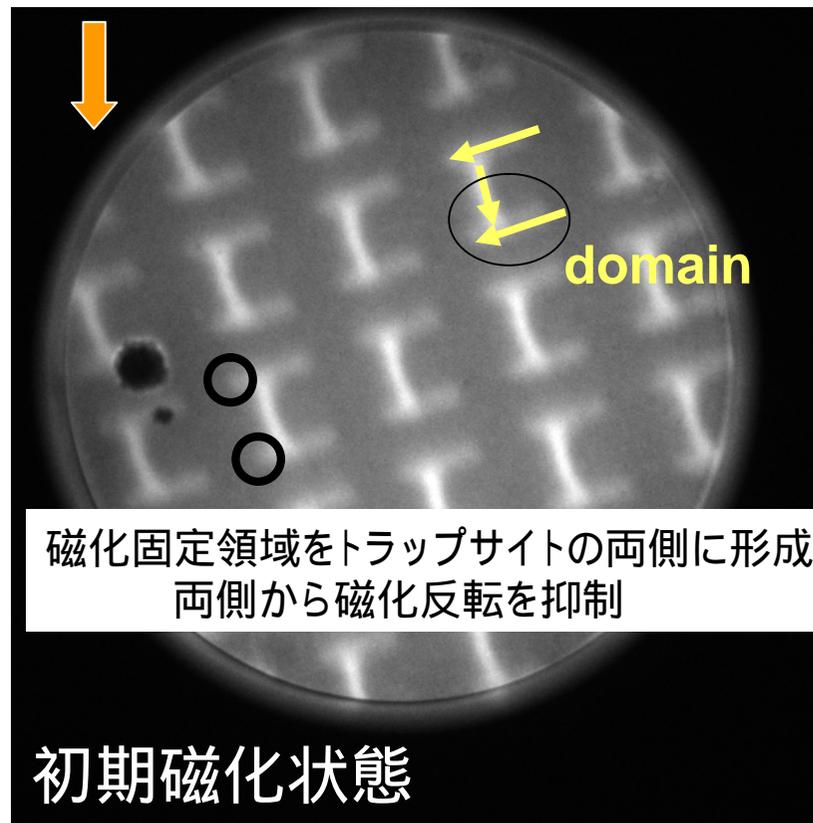
X-ray

耳長U字形状



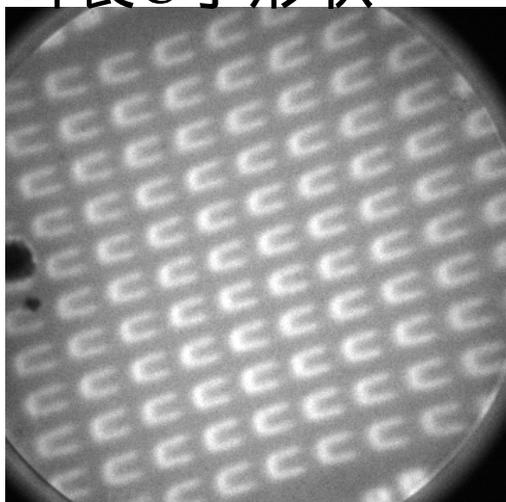
X-ray

H字形状

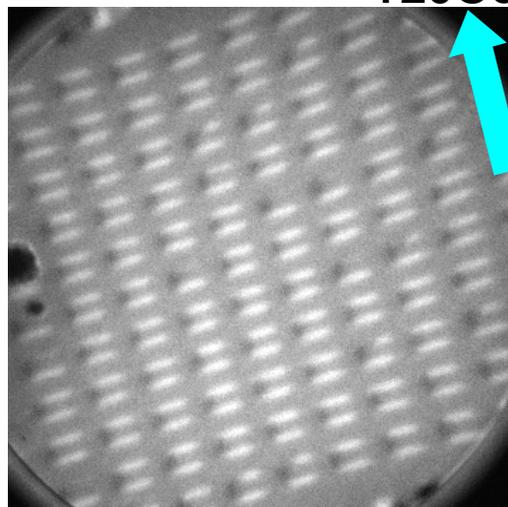


磁場印加による磁化配置の変化

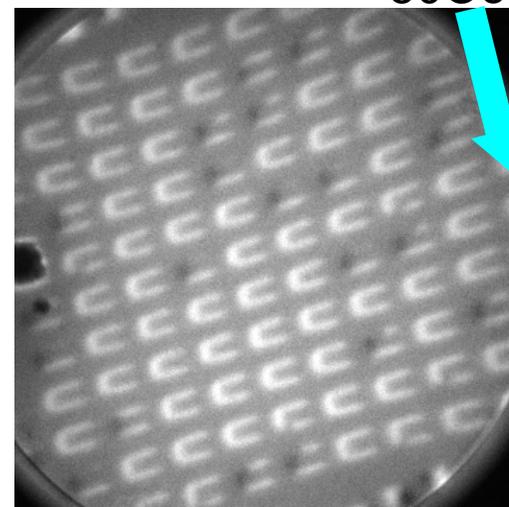
耳長U字形状



+200e

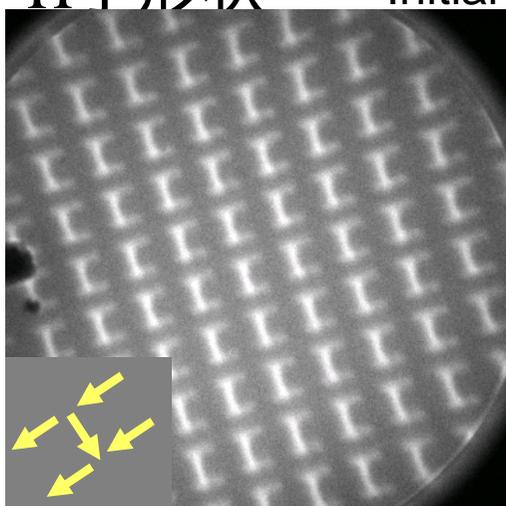


-500e

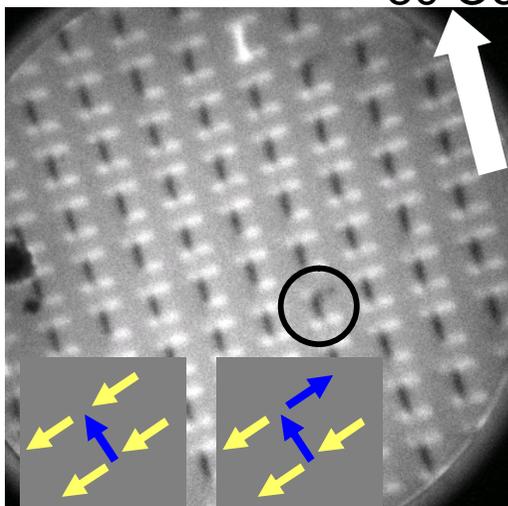


H字形状

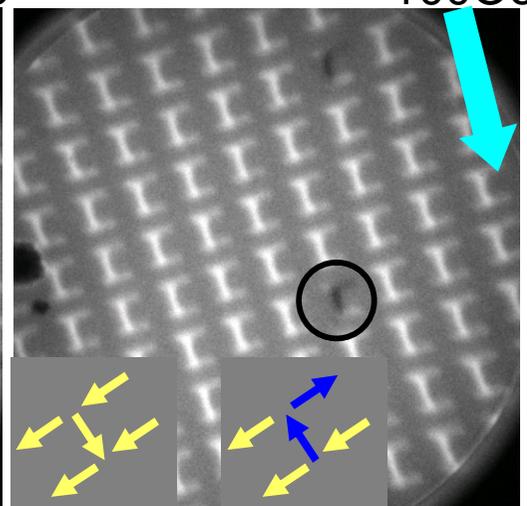
Initial



80 Oe



1000e



可逆
磁壁移動

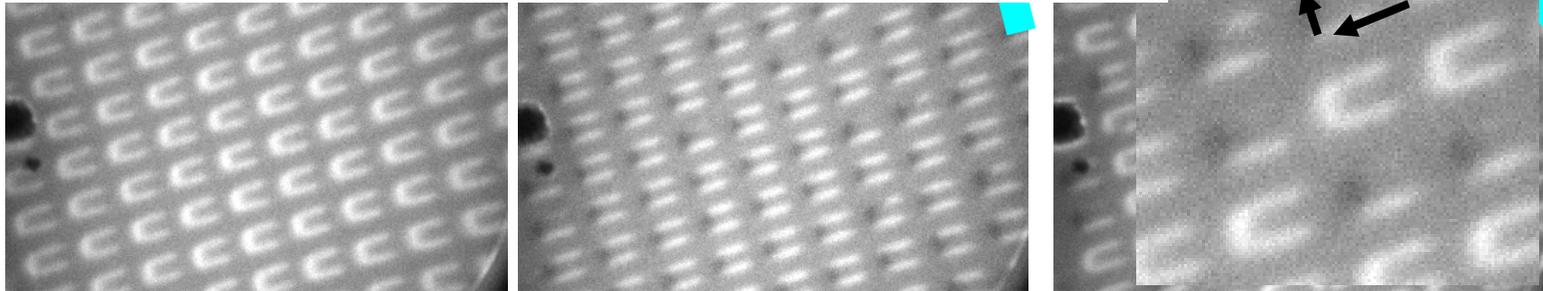
磁場印加による磁化配置の変化

耳長U字形状

トラップサイト間で可逆磁壁移動するパターン増加
磁壁がトラップサイトを越えるものが20%程度残る

+200e

磁壁がトラップサイトを越える



形状制御で磁壁移動の一様化、可逆磁壁移動の確率向上が可能

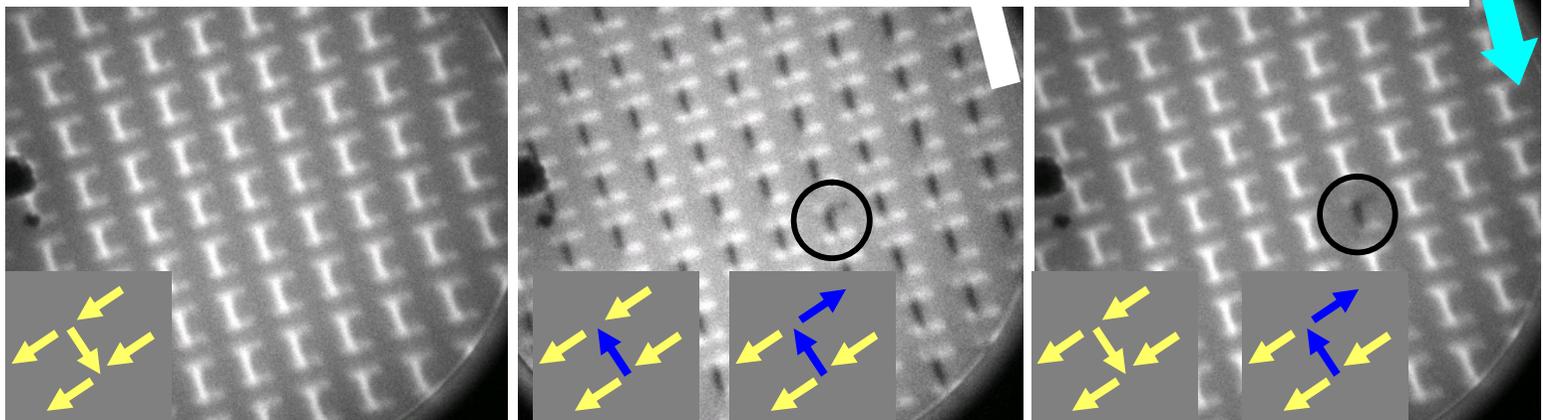
H字形状

Initial

80 Oe

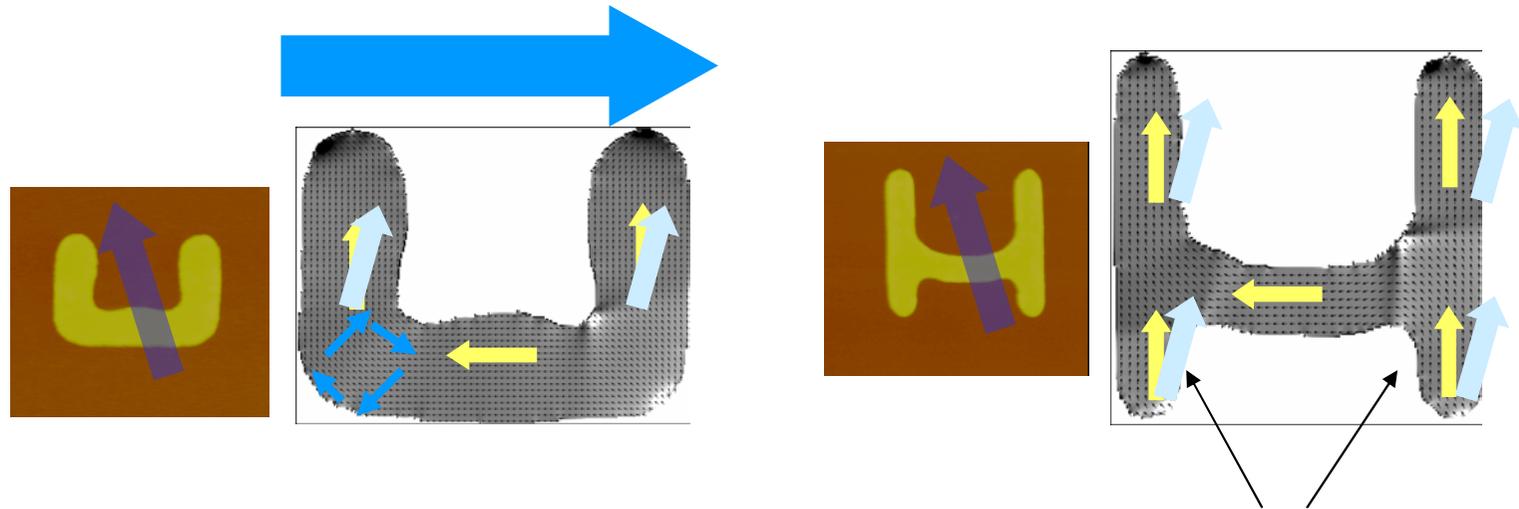
100Oe

大半のパターンで磁壁はトラップサイト間を可逆移動



可逆
磁壁移動

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
耳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 多様な磁区形成
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いため、純粹に外部磁場印加の寄与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

磁壁移動メモリの性能向上指針

その後の展開

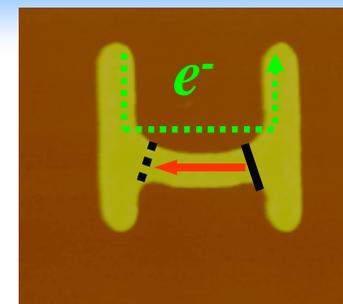
NiFeを用いた面内磁化膜 電流動作不安定

トラップサイト安定化しても電子と逆方向（電流）に、
確率的な磁壁移動

非スピントルク（熱）による動作不安定

NiFe細線磁区 磁壁のstochasticな移動（ローレンツTEM観察）と対応

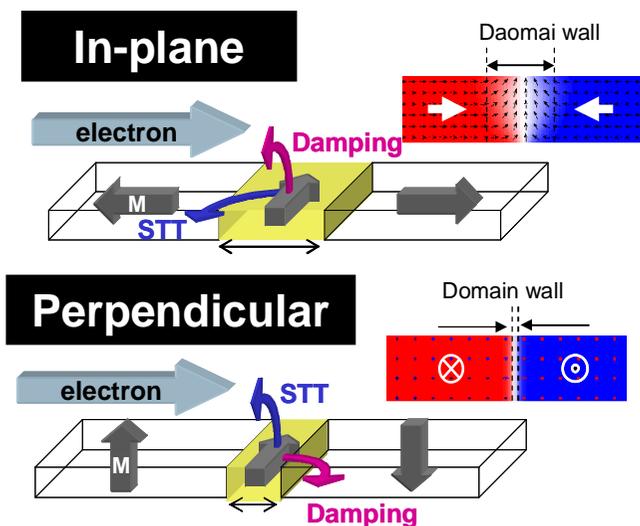
磁壁移動メモリへの適用は困難



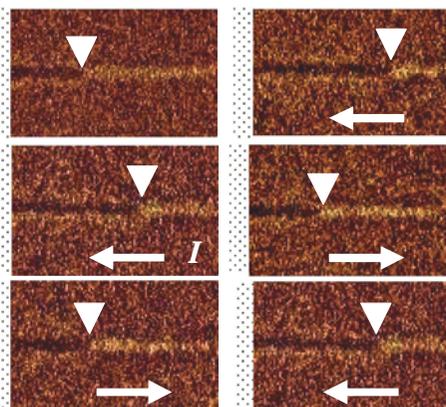
逆走：スピントルクでは
磁壁の動かない方向に動く

Y. Togawa et.al., JJAP 45 (2006) L1322

垂直異方性を持つ磁壁移動に展開



S.Fukami et. al., Intermag 2008 HH-11

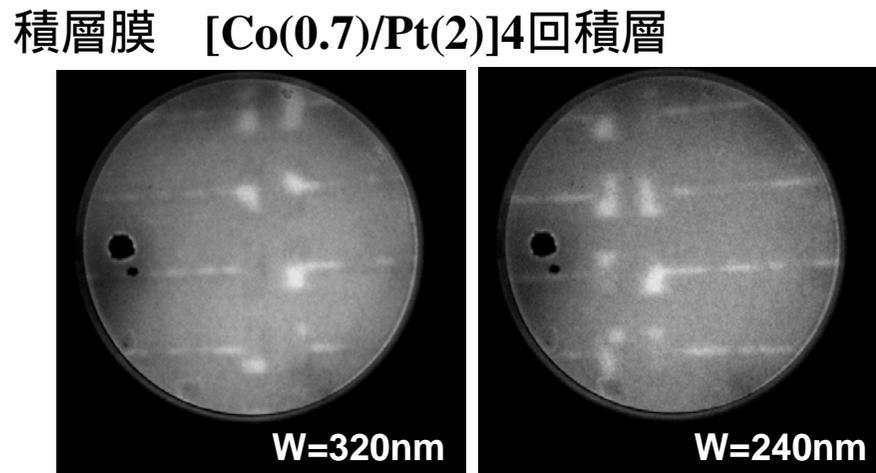
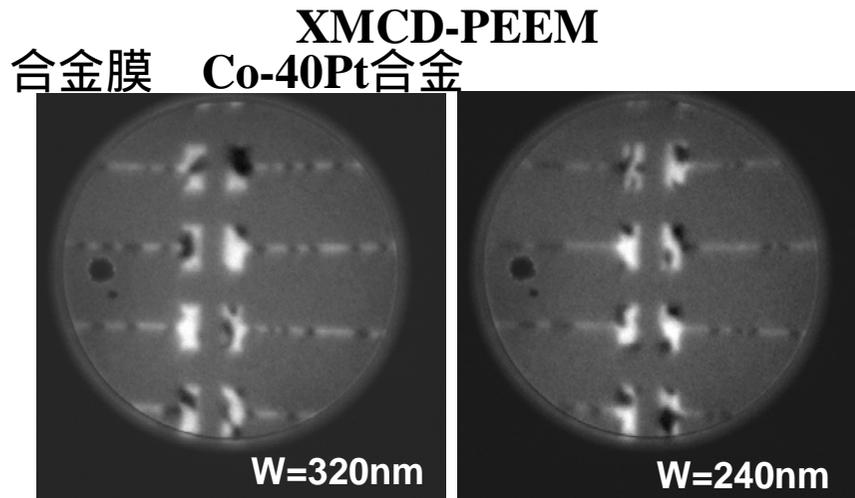


T. Koyama et al.
Appl. Phys. Express 1 (2008) 101303

Co/Ni垂直磁化膜を利用して

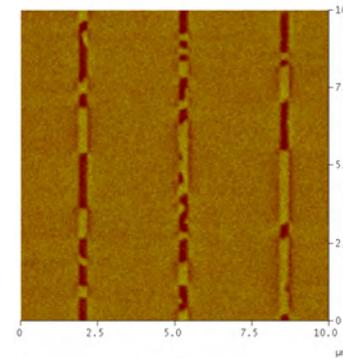
- 磁壁電流駆動の確認
- デバイス動作検証中

例 Co-Pt垂直磁化膜の磁区観察

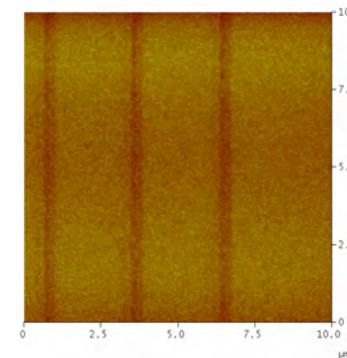


W=240nmまでの細線で磁区観察

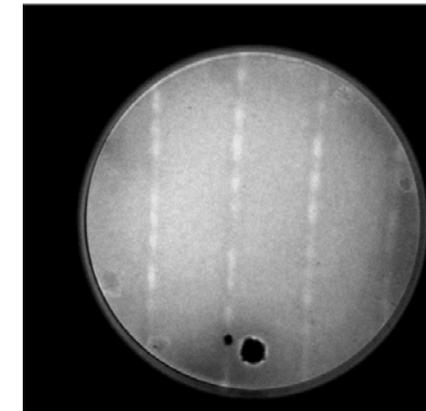
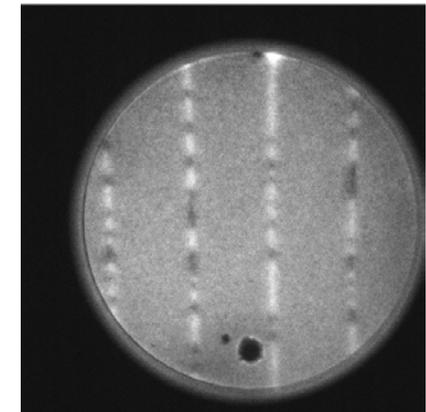
MFM観察



パターン：
W=320nm、L=15 μm
成膜、加工時に着磁なし



XMCD-PEEM

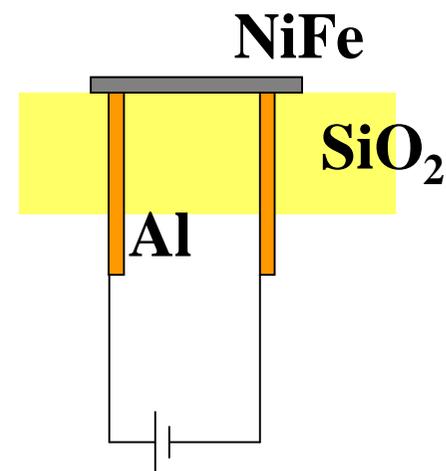
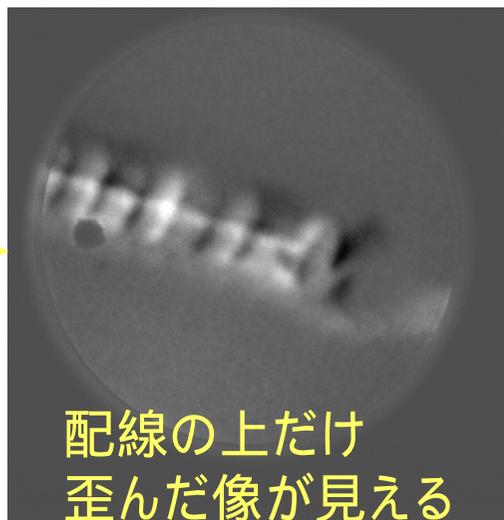
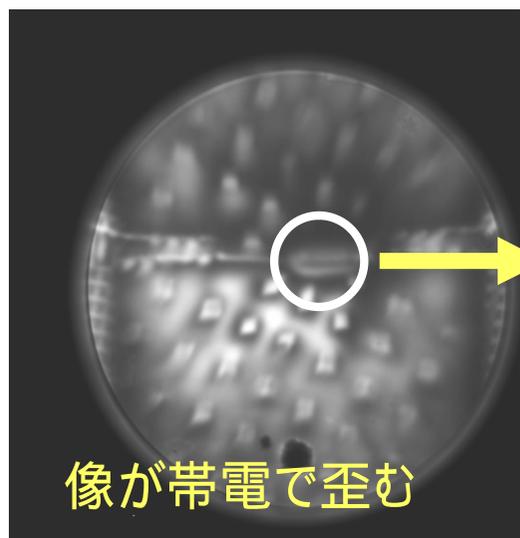


MFMで見えなかった磁区が観察可能
探針による磁区消失

その他の課題

電流による磁壁駆動の観察

磁壁移動メモリ：電流駆動で高速、低電流化
基本動作確認に必要



問題点：デバイス構成試料
電流注入以前に観察困難

チャージアップで像歪み

試料構造の改良

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字形状による安定な可逆磁壁移動実現の検証

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

◆ 課題： 更なる高分解能観察、スピン電流による磁壁移動観察