

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

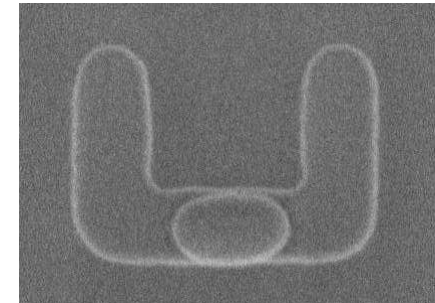
JST(元NEC)泉弘一氏、NEC 中田正文氏

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。

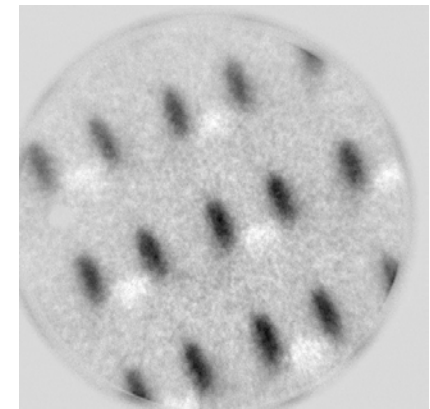
磁壁移動メモリ記録セル用サブミクロン磁性パターンの磁化配置、磁壁移動の観察

→ 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



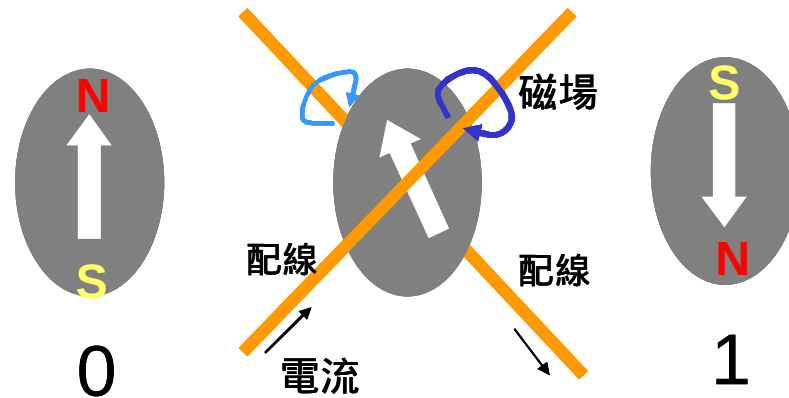
Outline

- 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

(Magnetoresistive 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 → 磁化方向で記録 電力供給が無くても維持される
- 高速 → 磁化反転はナノ秒オーダー
- 繰り返し耐性 → 磁化方向は何度変えても劣化しない

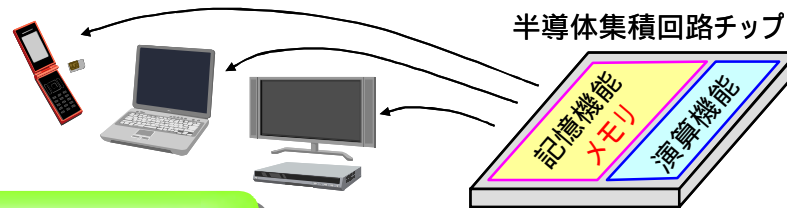
MRAMの可能性

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換え

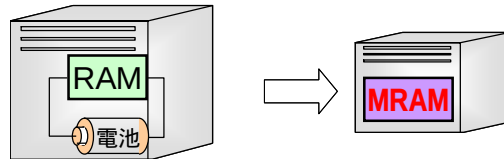
快適

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

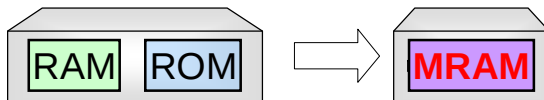


(例) 携帯機器が時間使用が長くなる (待機時電力「ゼロ」)

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

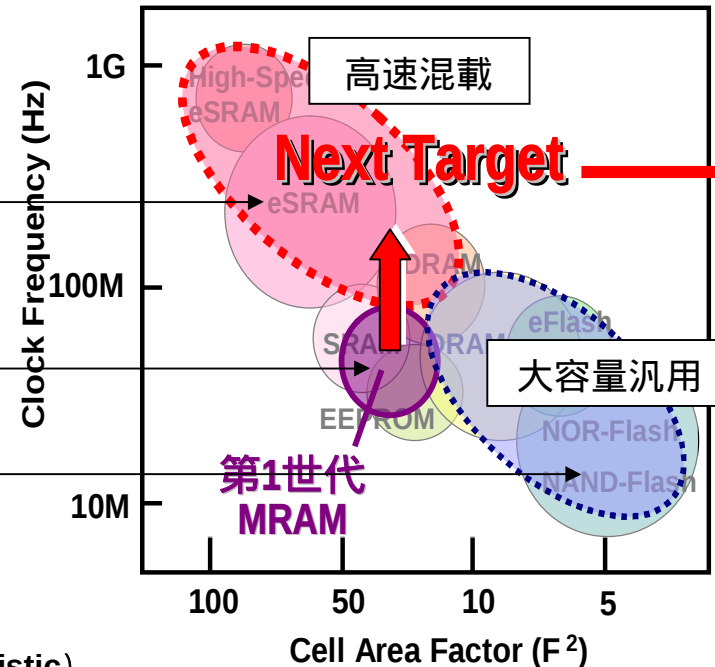


MRAM開発

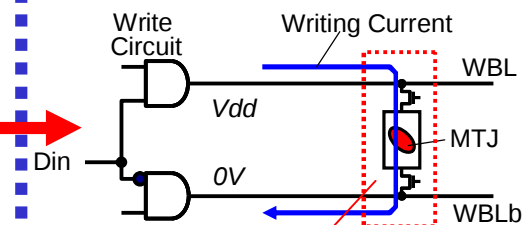
- ✓ 混載RAM (eSRAM、eDRAM) の置き換え (高速)
- 汎用DRAM、Flashの置き換え (大容量)

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)



混載用高速MRAM



2T-1R Cell (3端子)

書込、読出ディスタープ

→ なし

磁場書込みセルで
250MHz動作検証

R.Nebashi et.al., ISSCC 2009

- 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）

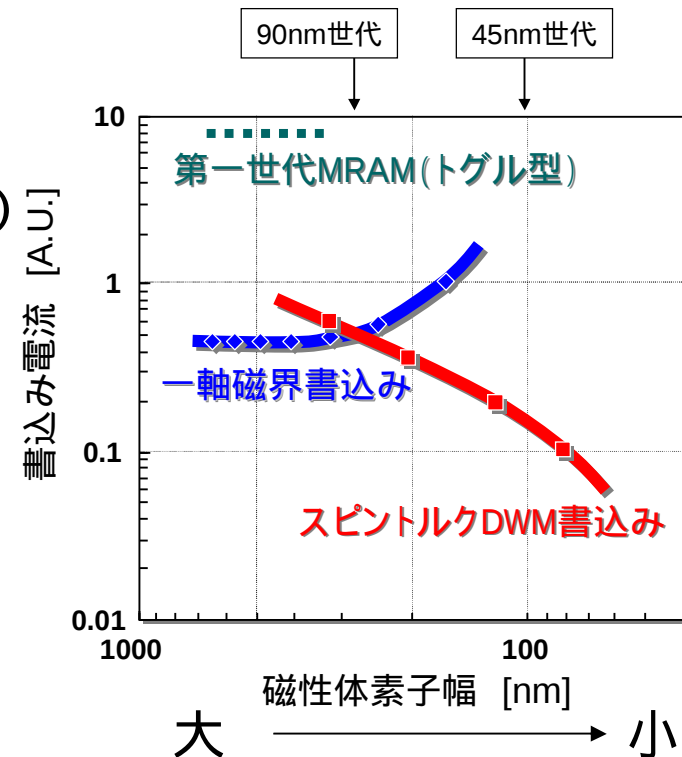
スピントルク書き込みMRAM:

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

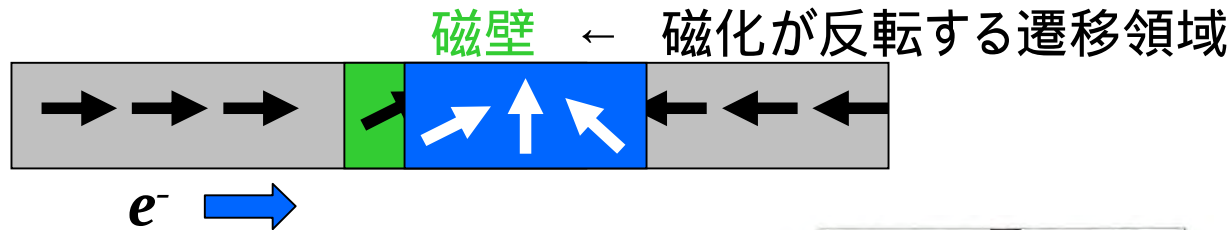
- ✓ スピン注入磁化反転
- ✓ 磁壁電流駆動

2Tr-1MTJ 構造 適用には磁壁移動型が容易（有利）



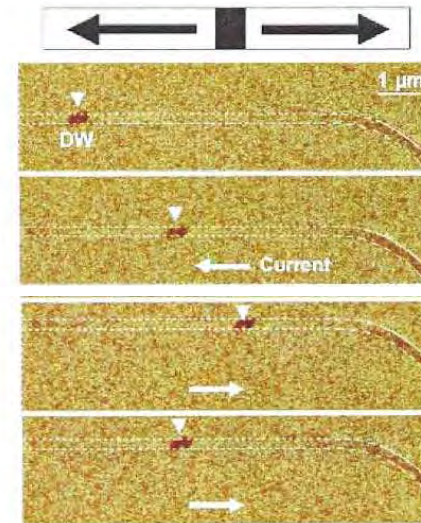
磁壁移動メモリ

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 : $1.2 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$

NiFe 10 nm, 240 nm width

τ_p 0.5 μsec

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

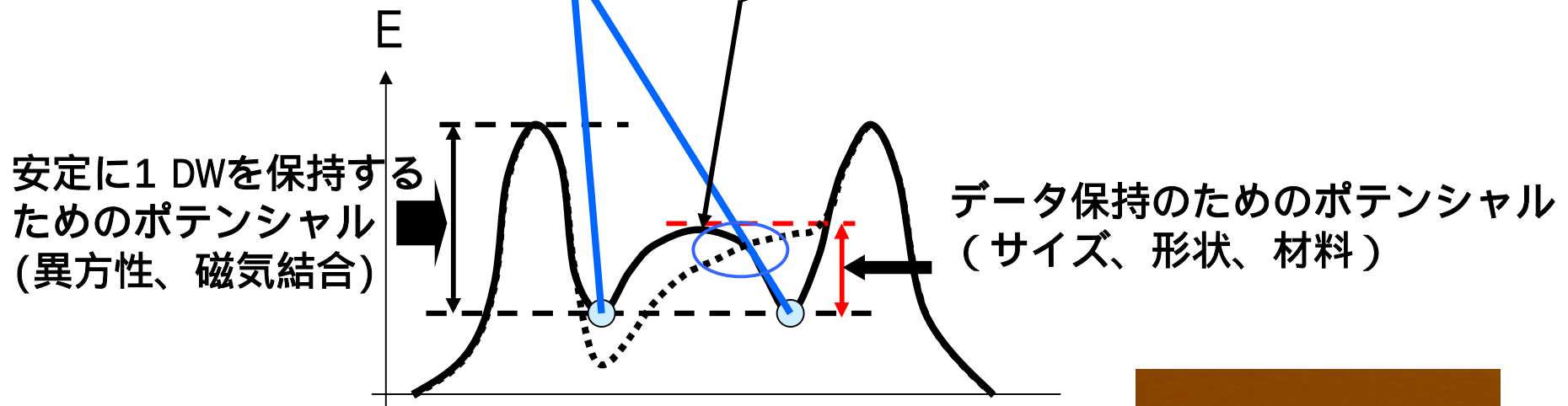
メモリにするには

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。

途中に準安定な状態
(DWの引っかかり等)が無い

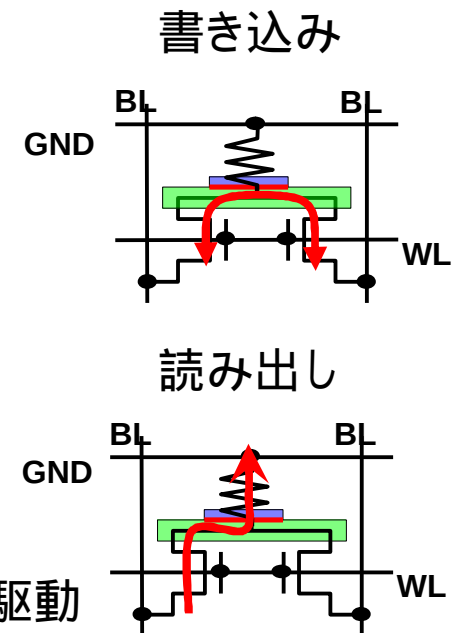
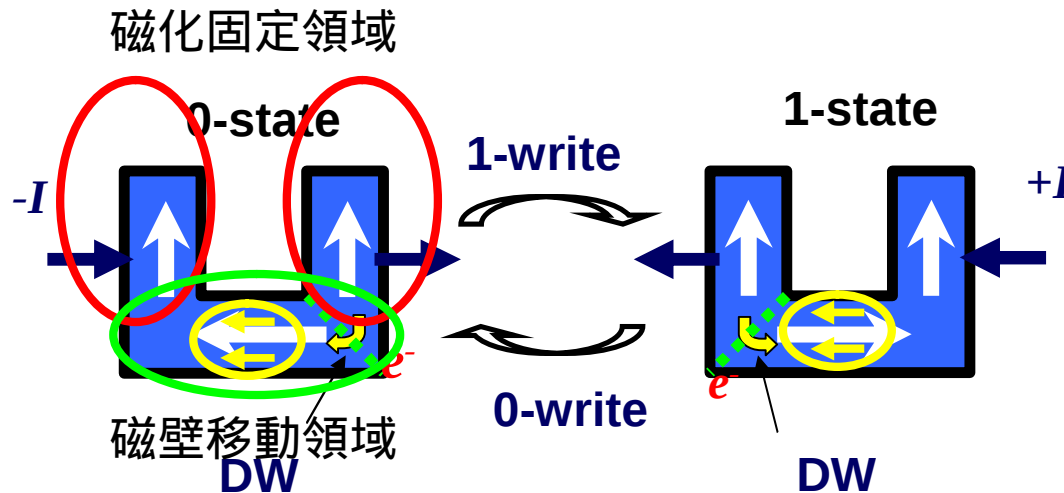


簡単に満たす形状

→ 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

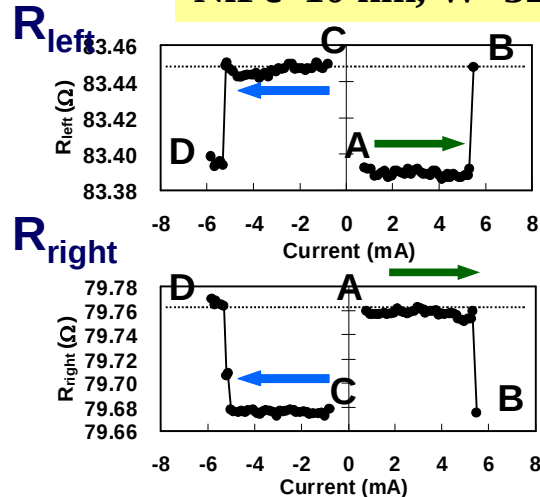
■ 書き込み電流パスと読み出し電流パスが別経路

- 読み出し時の誤書き込みなく、バリアダメージ軽減

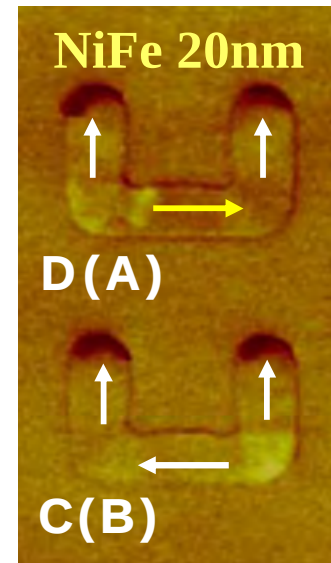
NiFe/U字形形状パターンによる原理動作

磁壁電流駆動(書込)

NiFe 10 nm, W=320 nm

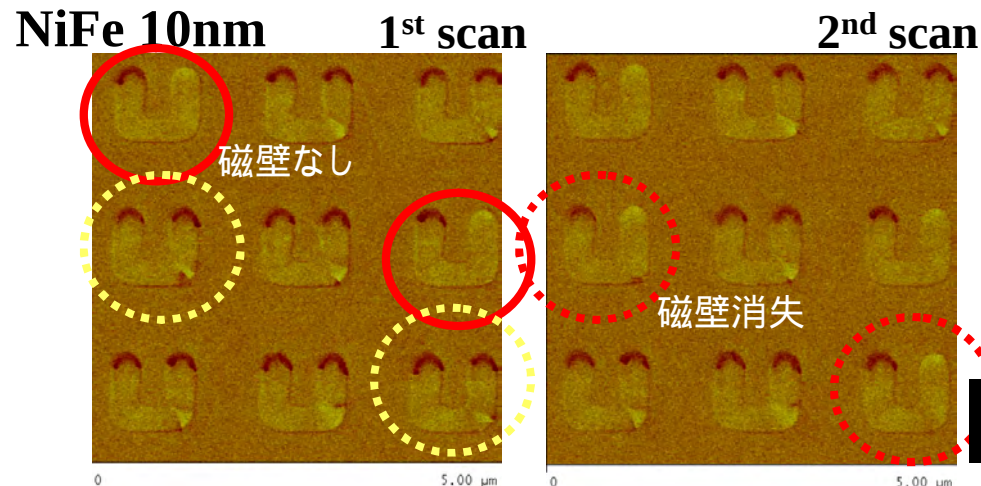


Current density $\sim 1.2 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$



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.



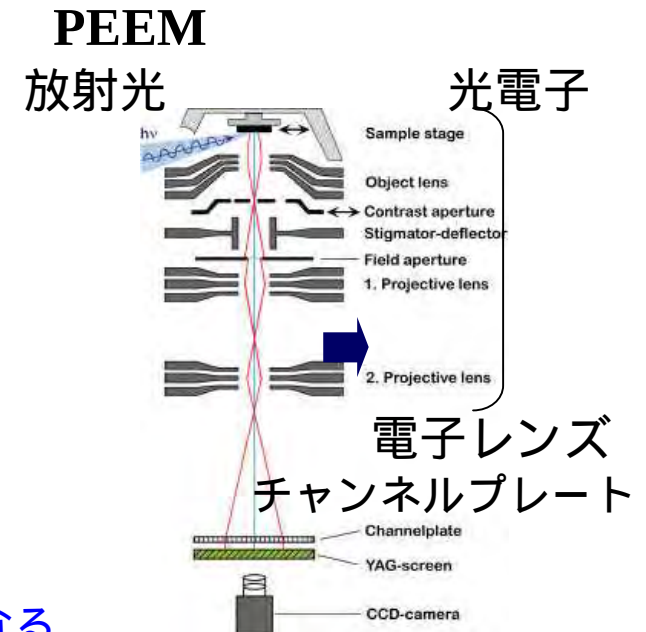
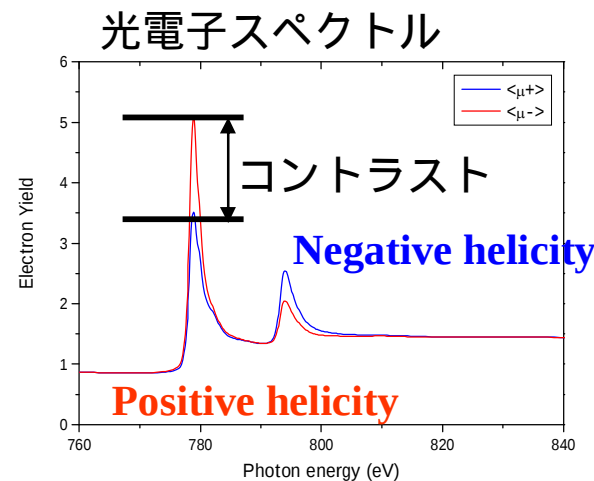
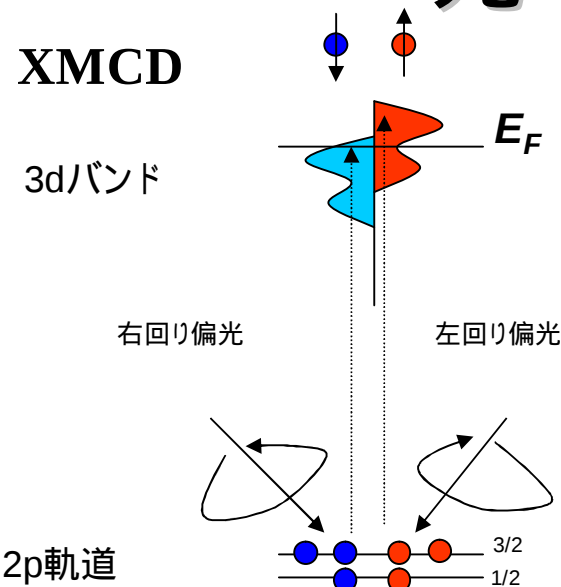
探針磁場による磁区構造変化
→ 磁場 / 電流による磁壁移動と
区別がつかない。

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？

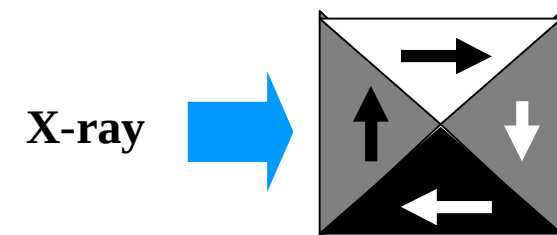
X線磁気円二色性(XMCD) 光電子顕微鏡(PEEM)



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

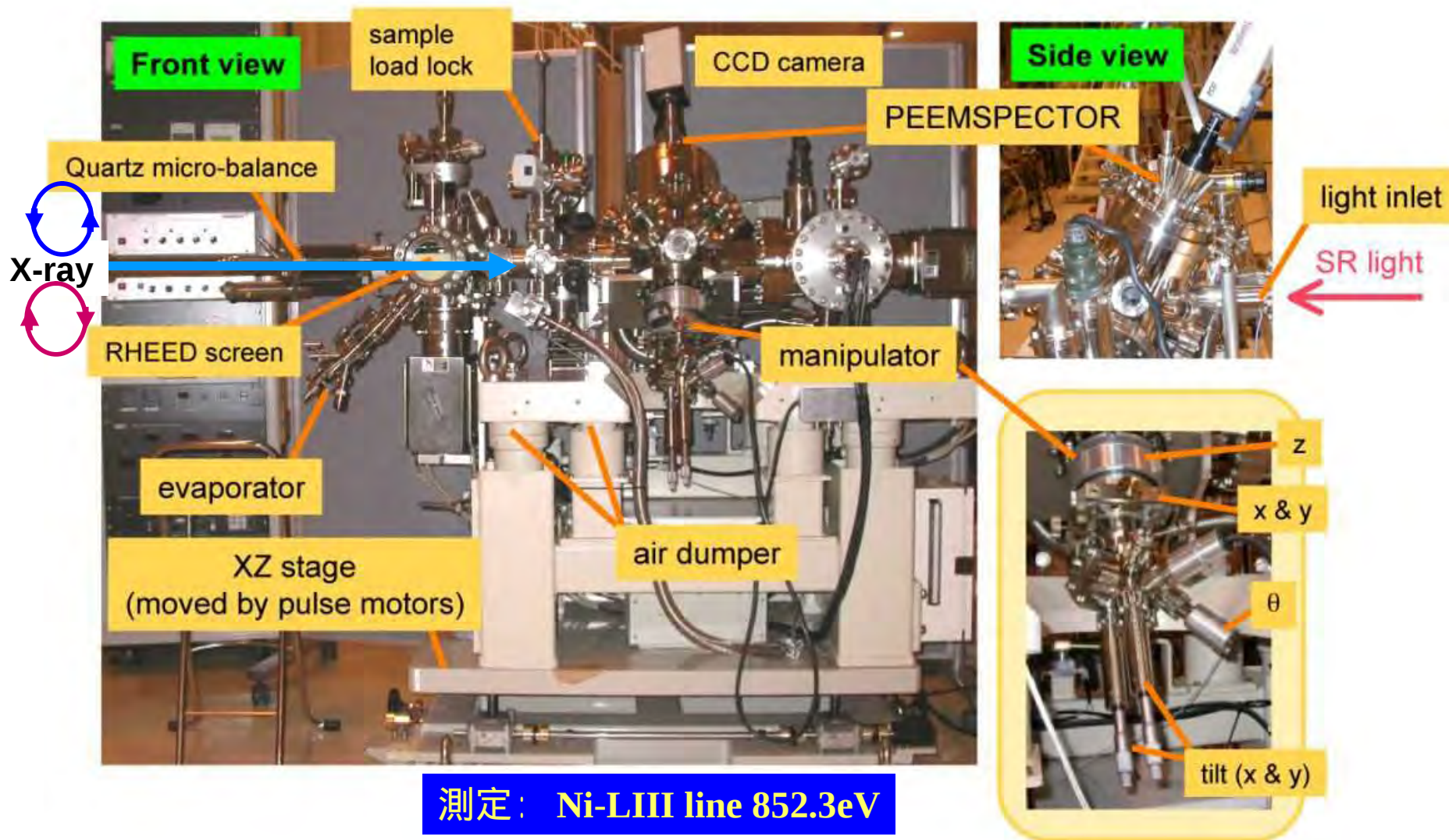


試料への磁場影響なく高分解能な磁区観察が可能
装置内で磁場印加すれば磁化配置変化が見える

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

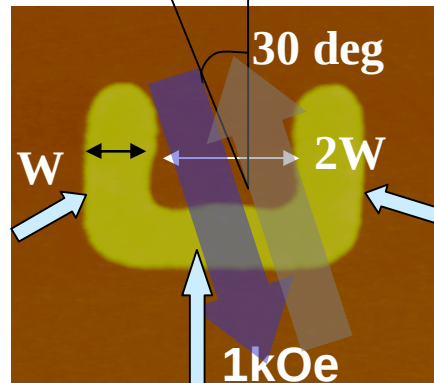
パターン形状

着磁

1.0kOe、60sec、傾斜30°

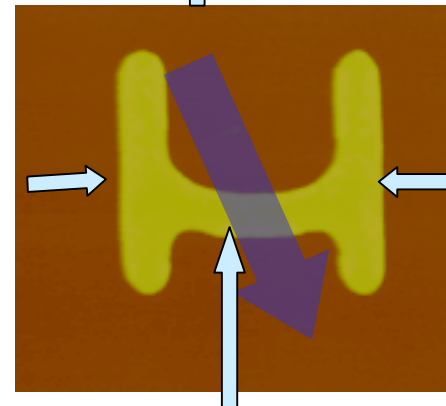
U字形状

磁化固定領域



H字形状

磁化固定領域



磁壁移動領域

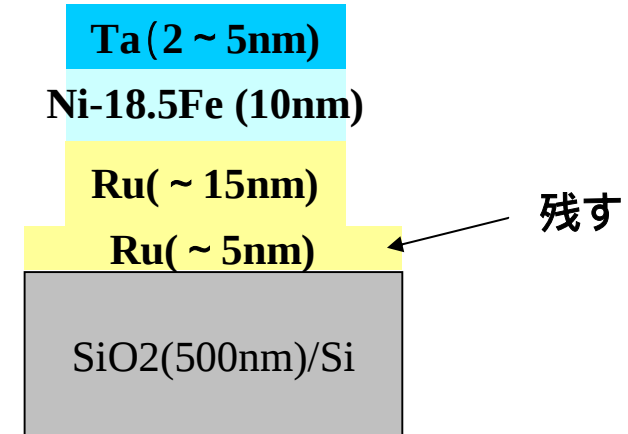
磁性膜構成

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

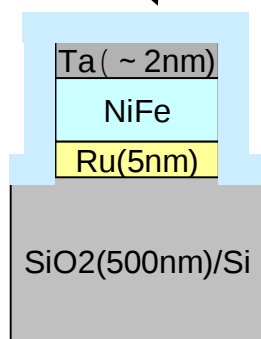
観察試料の作製検討

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

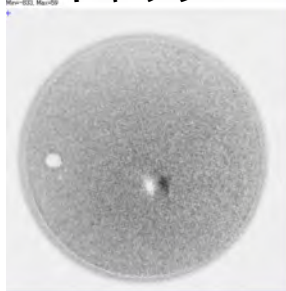
予備検討試料

Charge up防止cap層
Ta(3)、Al(3)



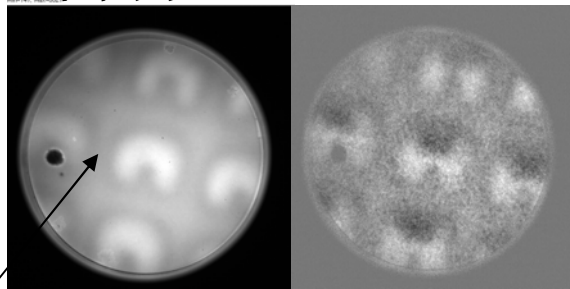
下地Ruまでパターニング時に
除去、charge up防止層として
Ta,Alを成膜

Taキャップ



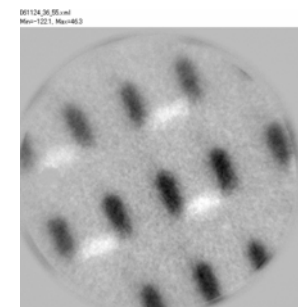
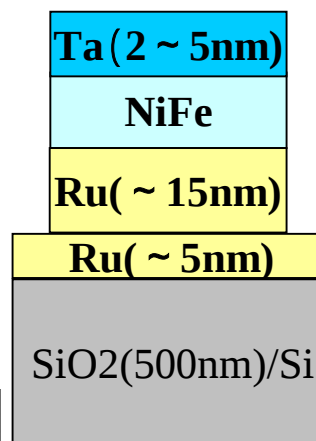
XASが弱く微小パターン観察困難

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

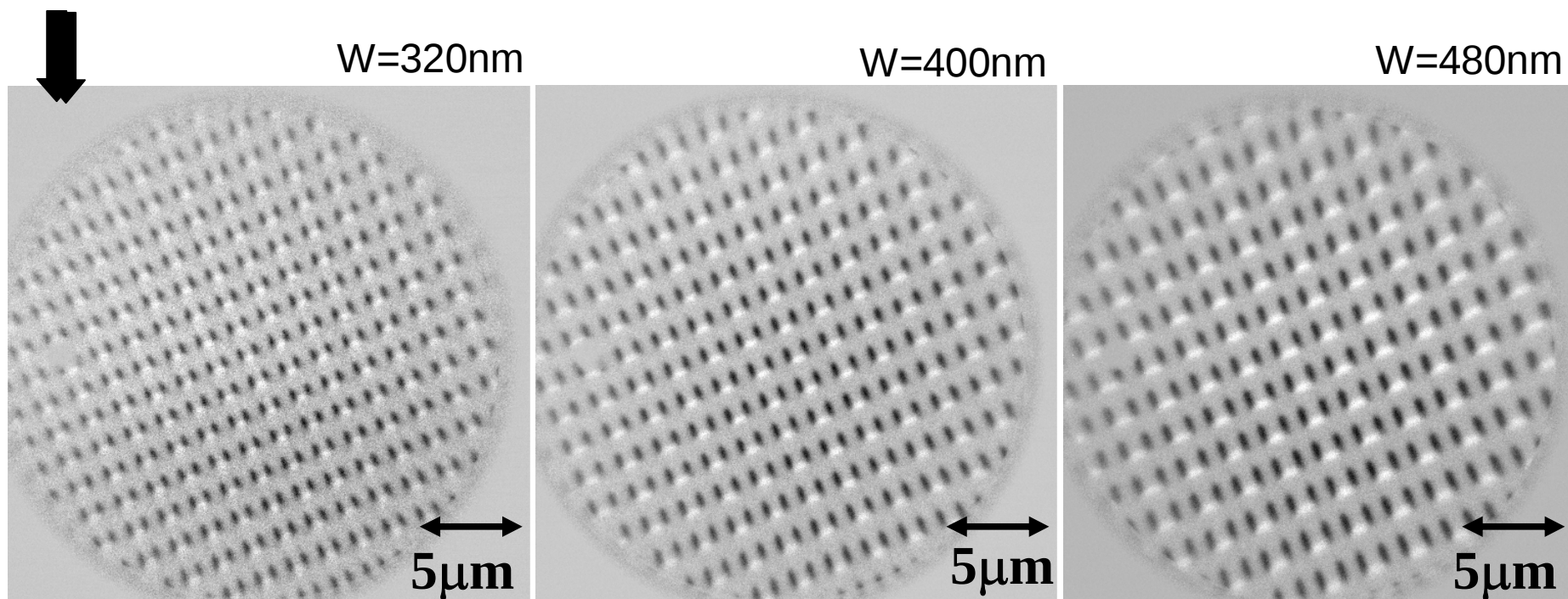


よく見える！

それらしい像はあるのだが・・・

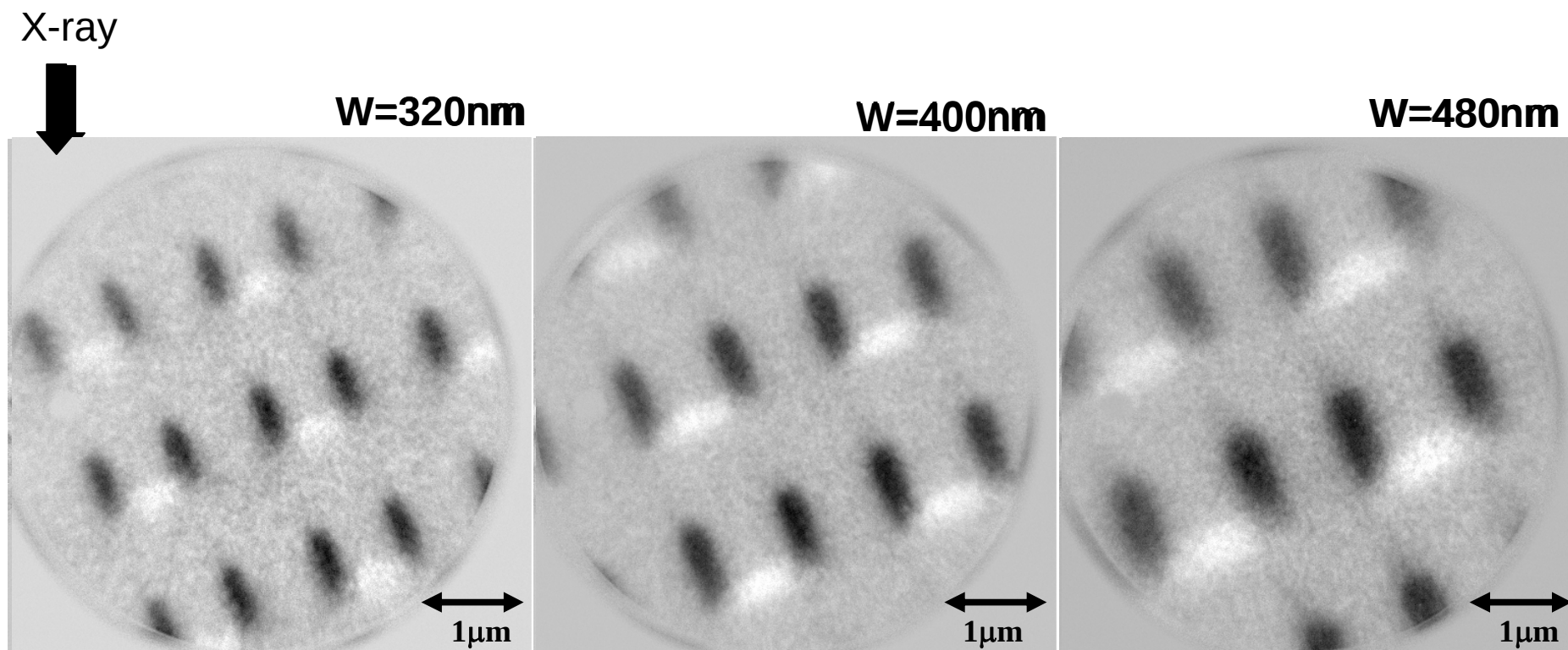
U字形形状パターンの磁区イメージ

X-ray



広範囲で一様な磁区を形成

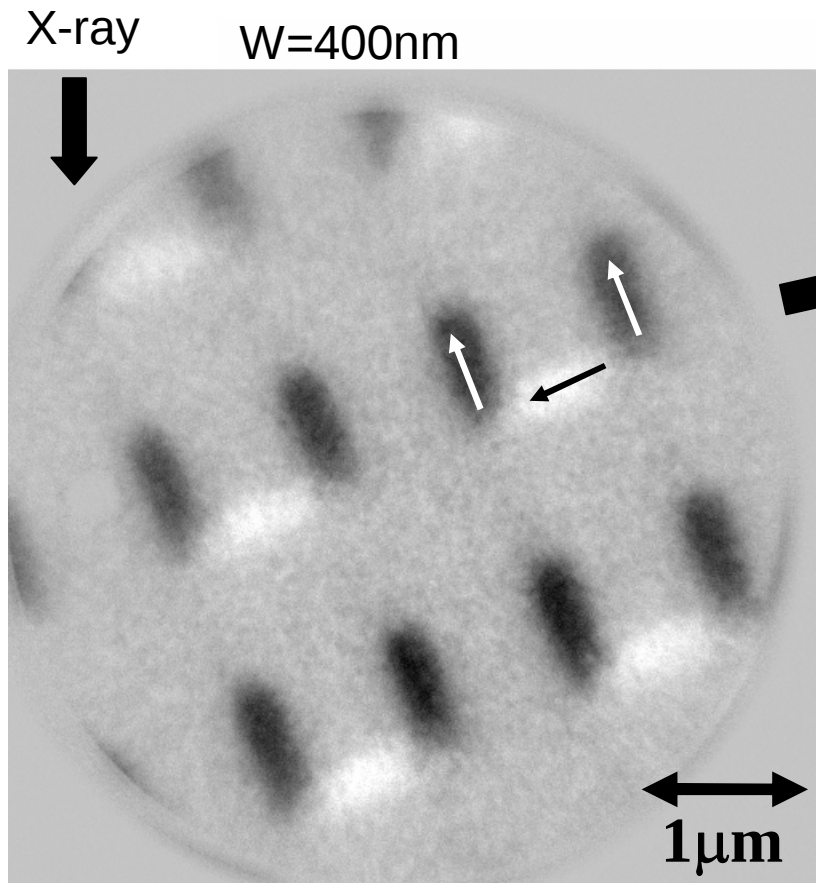
U字形形状パターンの磁区イメージ



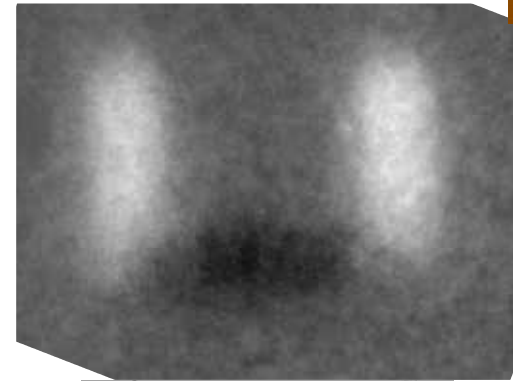
広範囲で一様な磁区を形成

W=320nmまで磁化配置が明確にわかる

磁区構造の解析

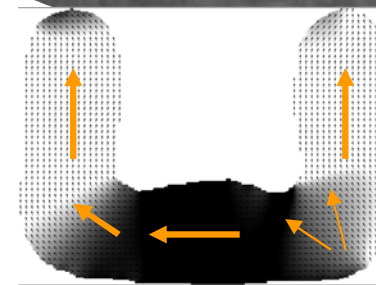


白黒反転



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

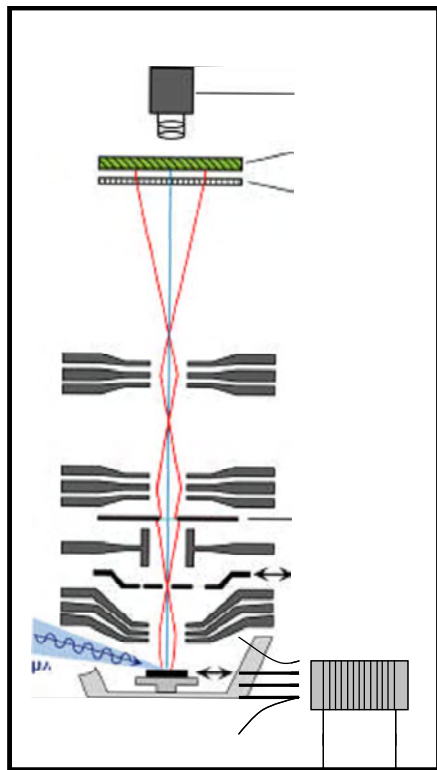
所望の磁化配置
DWMメモリ動作に好都合な磁区構造

U字形状パターンに磁壁導入→磁区観察

結果

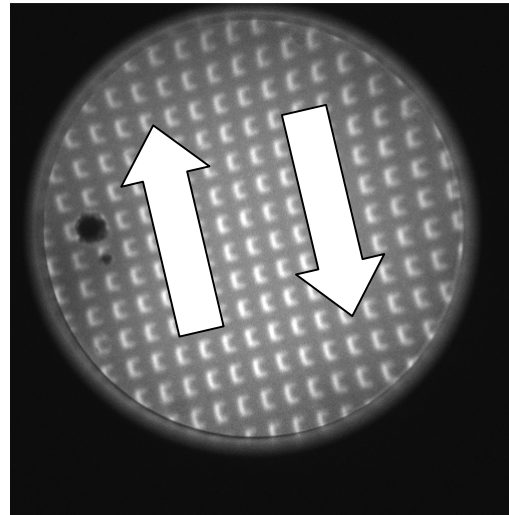
- ✓ 高分解能磁区観察
線幅320nmまで磁化配置が明確
- ✓ 磁化方向、磁区構造（ Transverse構造 ）決定
→ LLGシミュレーションと対応
- ✓ U字形状パターン磁区構造
広範囲で一様になることを確認

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

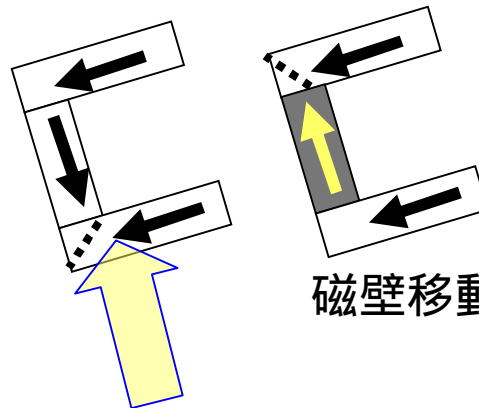
Max 100Oeの磁場

磁場印加時間 約1msec

磁場印加方向

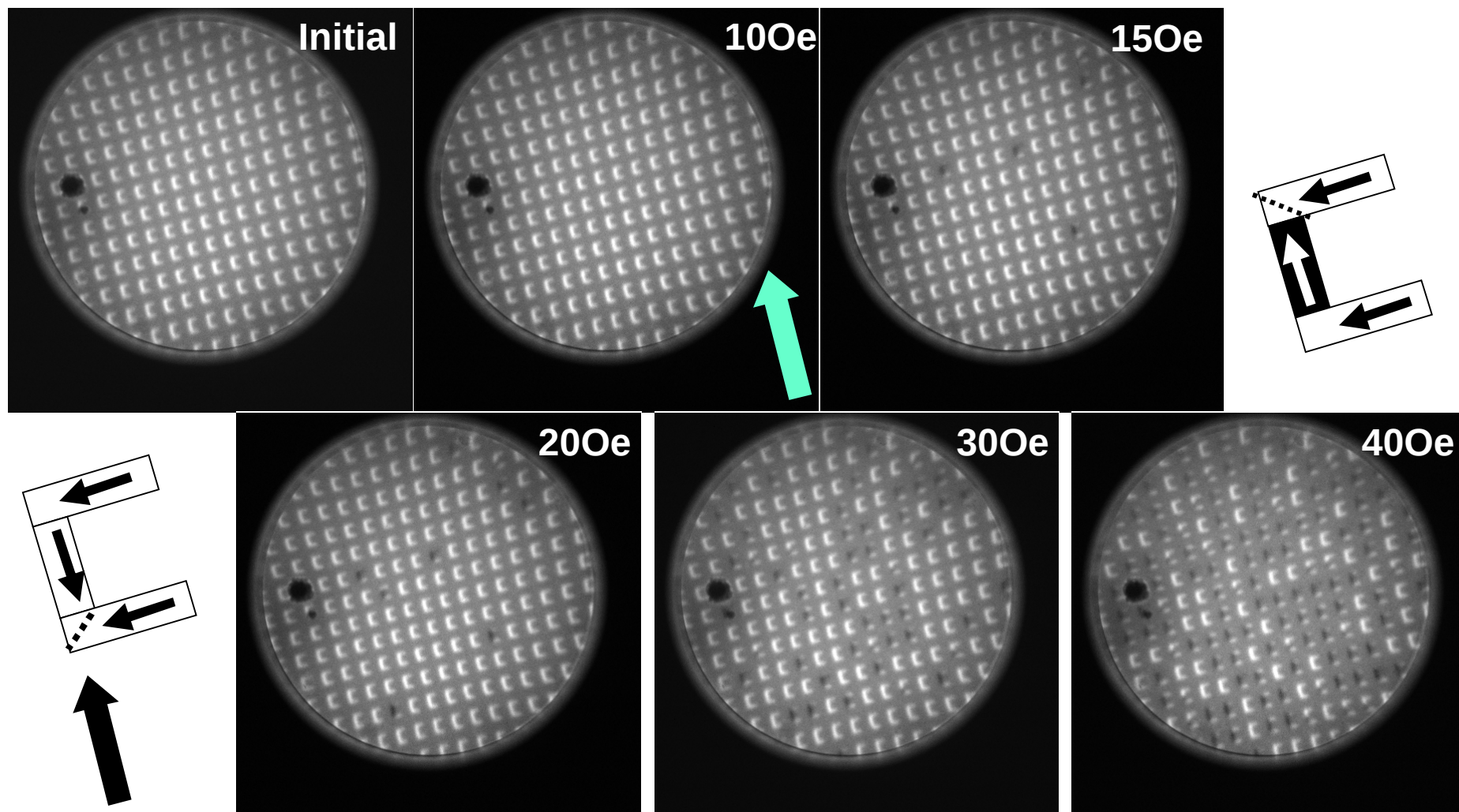
磁壁移動領域に平行方向

試料を回転して調整



磁壁移動

磁区構造の磁場依存性

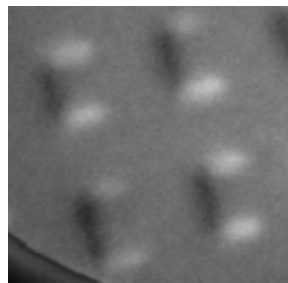
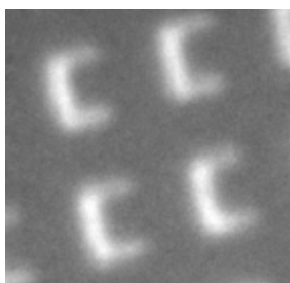


磁場印加により磁壁移動領域の磁化が反転

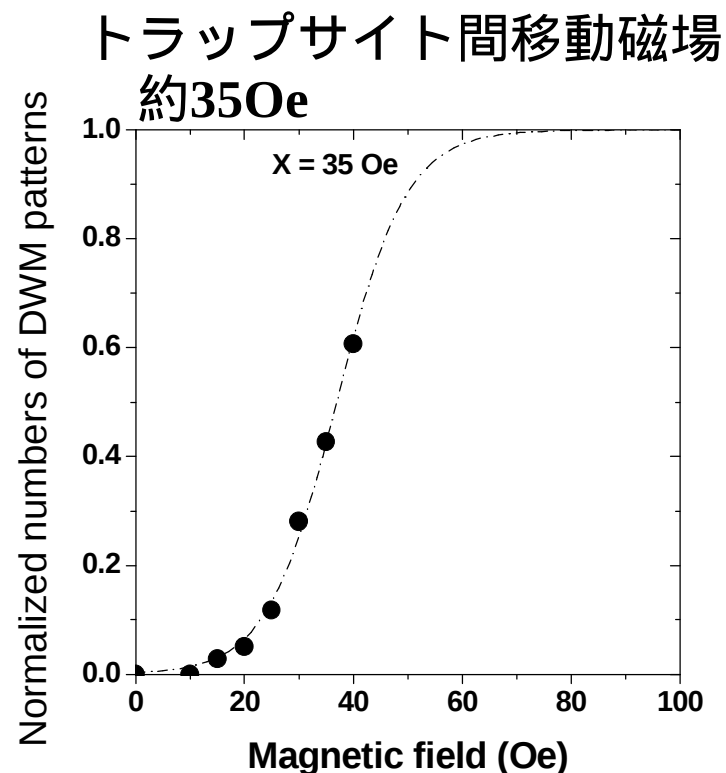
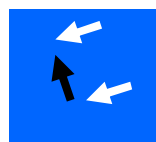
磁壁移動の確認

平均磁壁移動磁界の見積もり

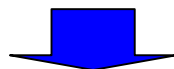
W=320nm、NiFe10nm



変化した個数を数える

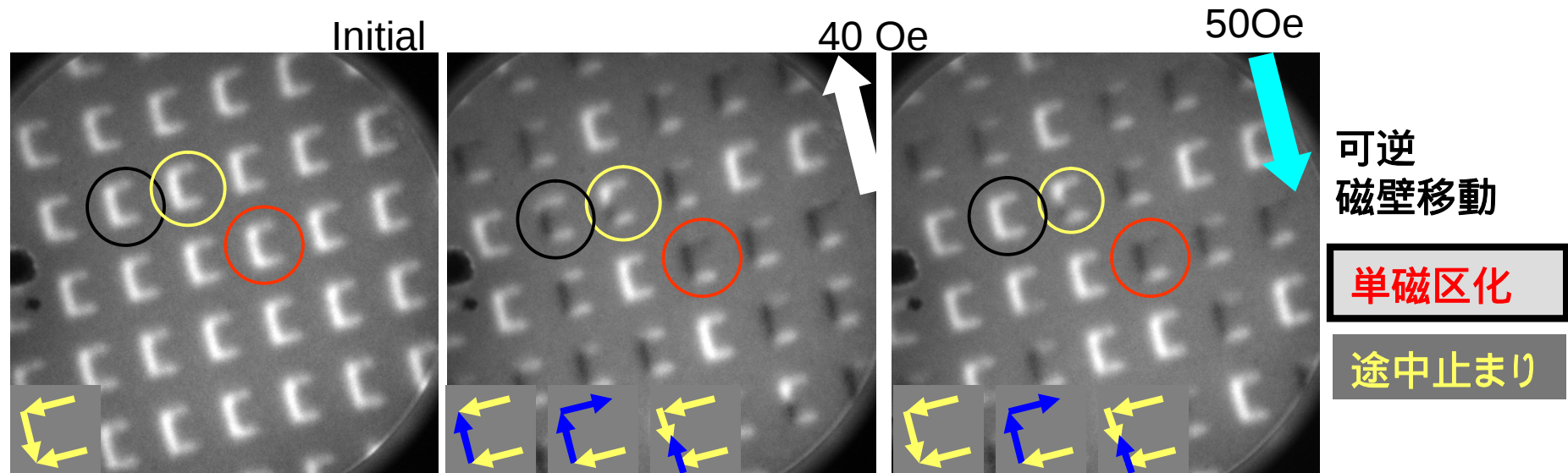


電気抵抗測定による磁壁移動磁場(～30Oe)とほぼ対応



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

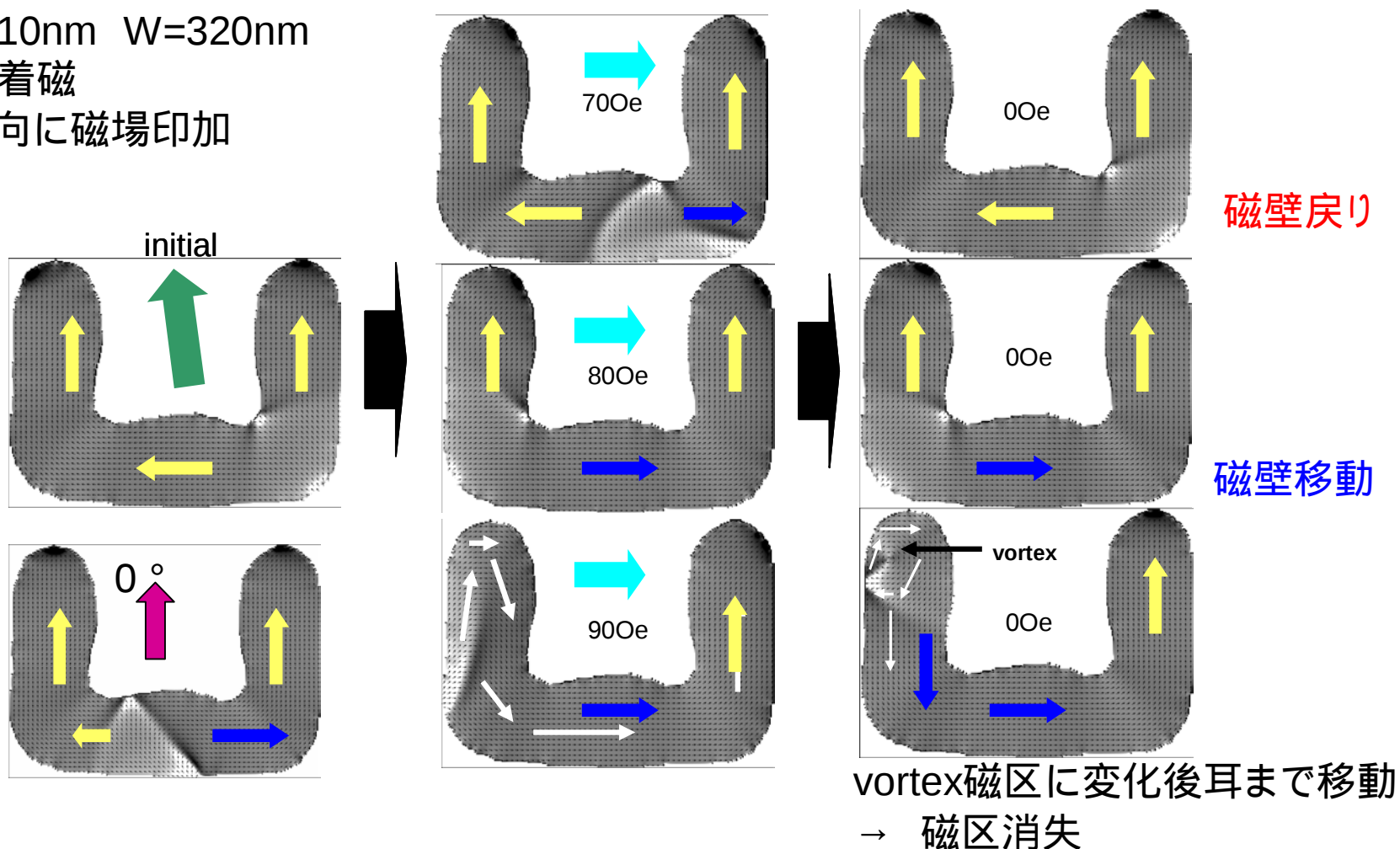


- トラップサイト間移動 → 可逆変化
- 単磁区化 → それ以上変化しない： 発生頻度が高い
- 途中止まり → 戻ったり戻らなかったり

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字形状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

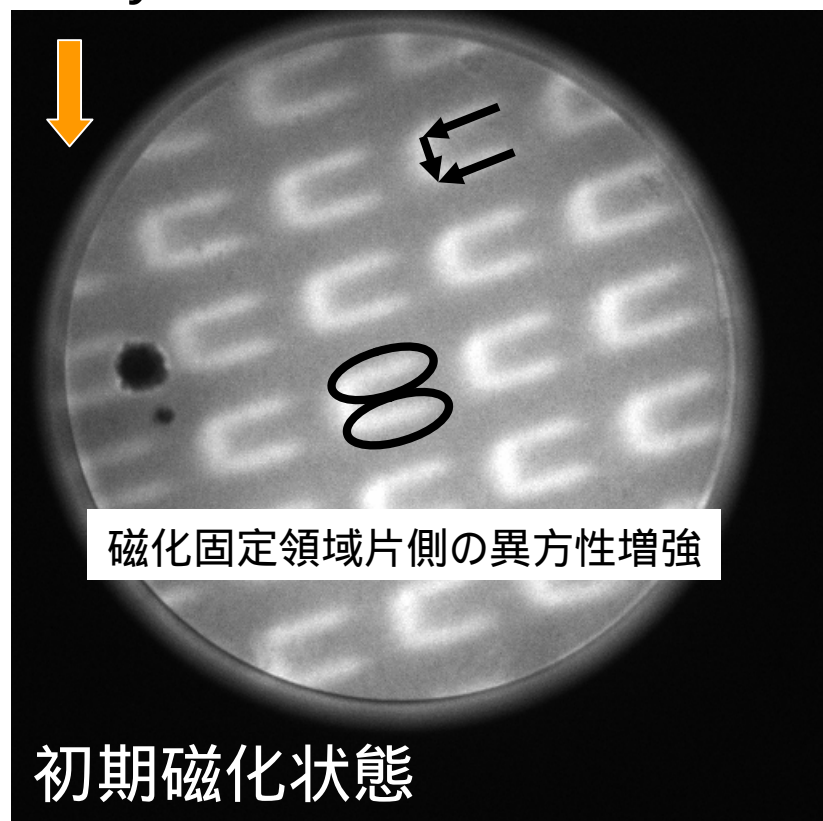
形状異方性を増強した磁気パターン

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

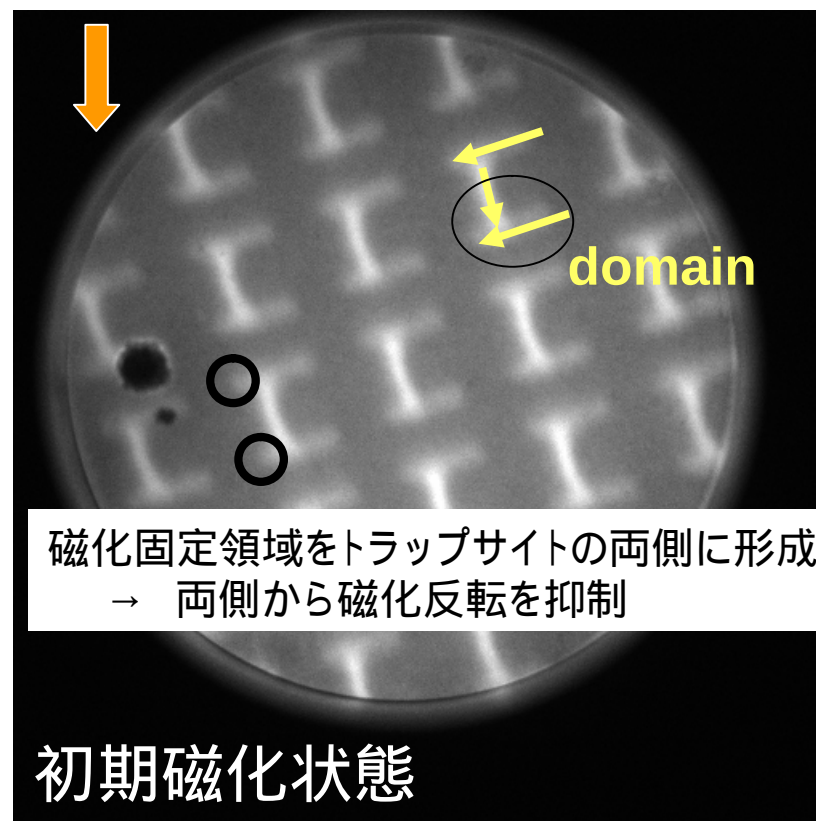
X-ray

耳長U字形状



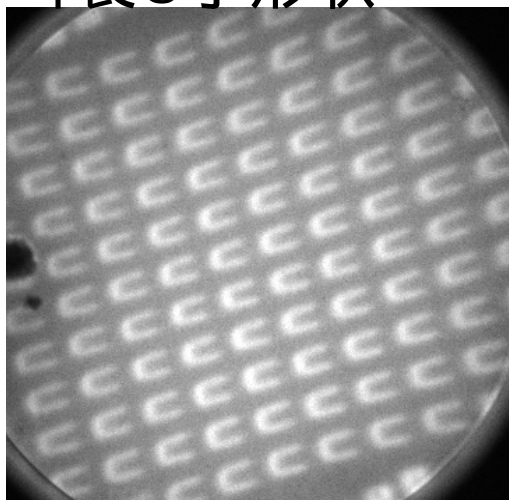
X-ray

H字形状

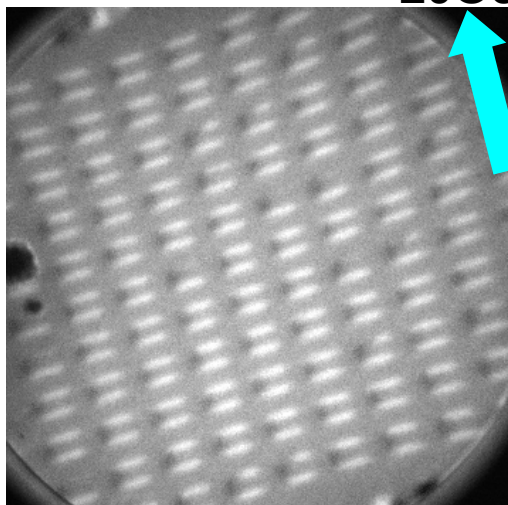


磁場印加による磁化配置の変化

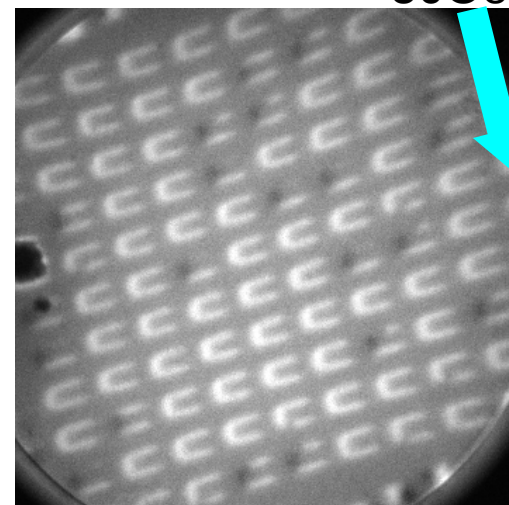
耳長U字形状



+20Oe

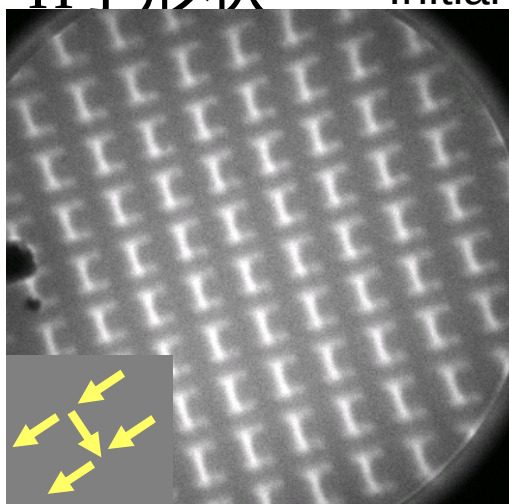


-50Oe

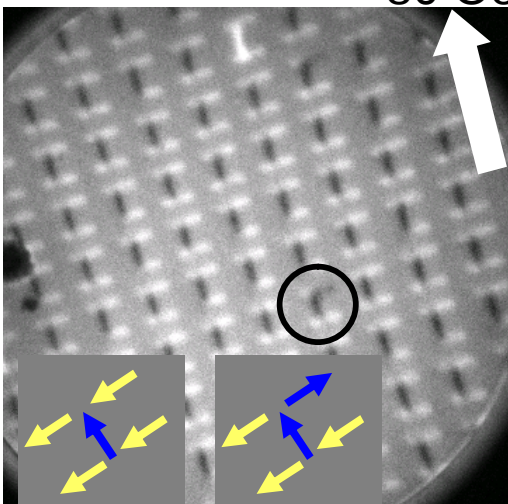


H字形状

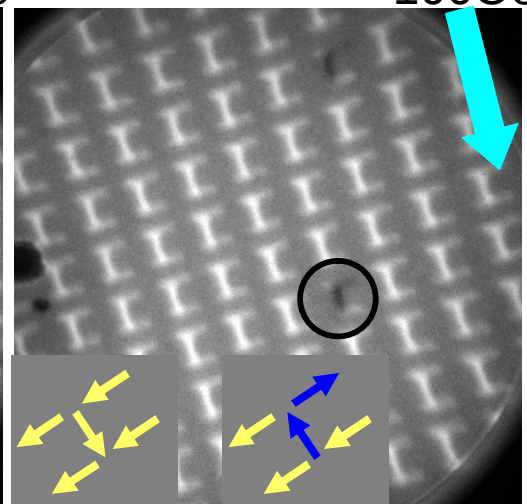
Initial



80 Oe



100Oe



可逆
磁壁移動

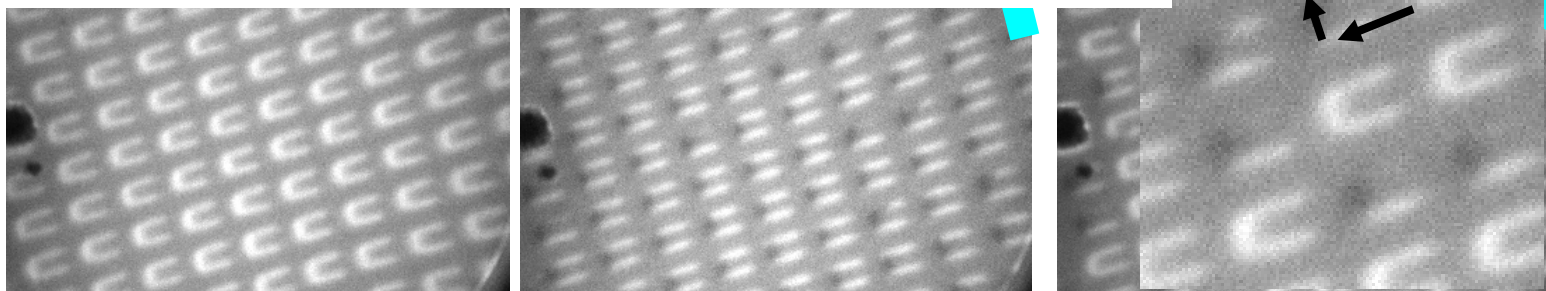
磁場印加による磁化配置の変化

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

+20Oe

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

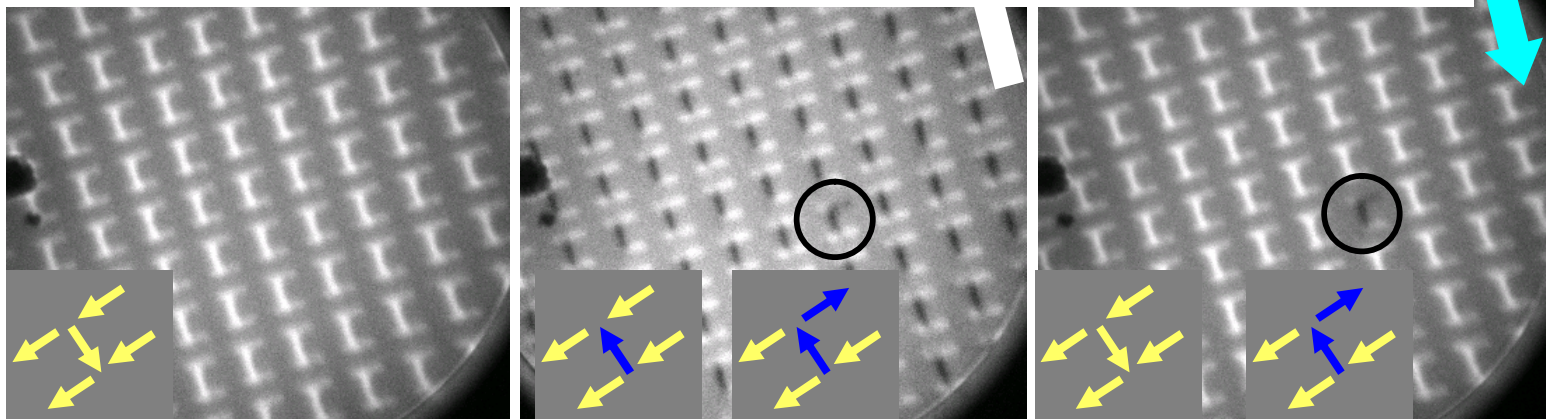
H字形状

Initial

80 Oe

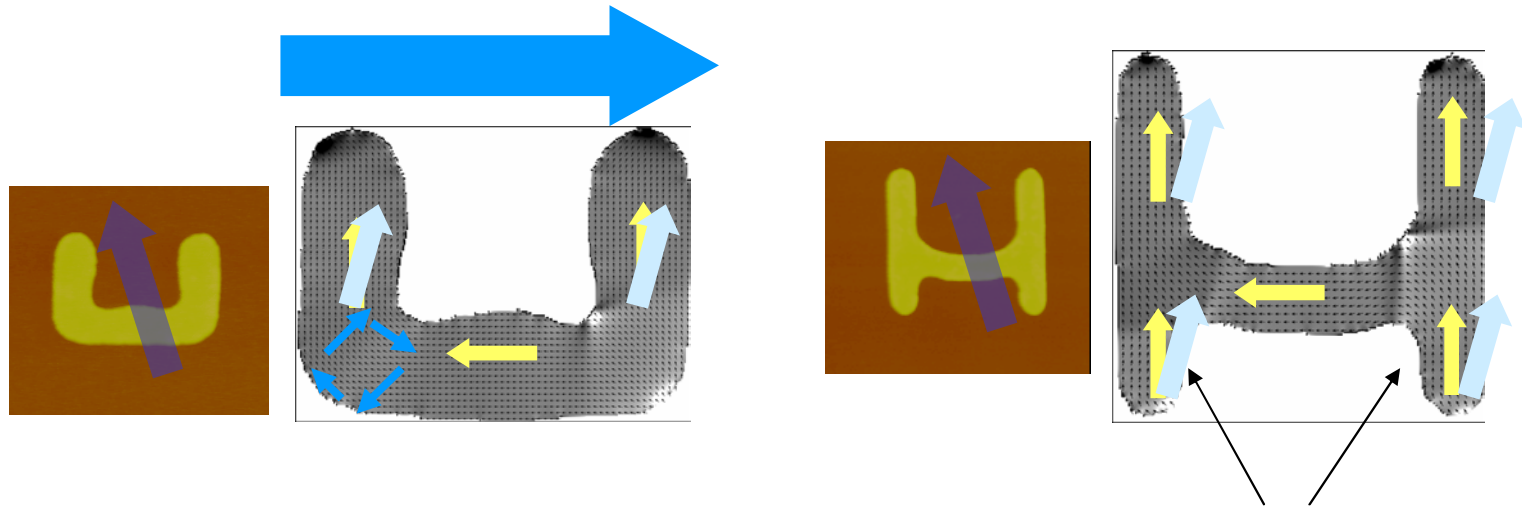
100Oe

- 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

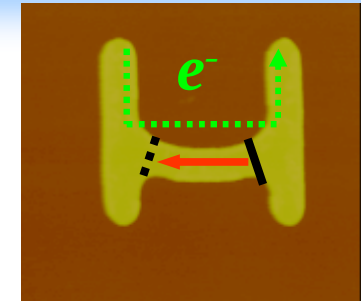
- **NiFeを用いた面内磁化膜 電流動作不安定**

→ 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

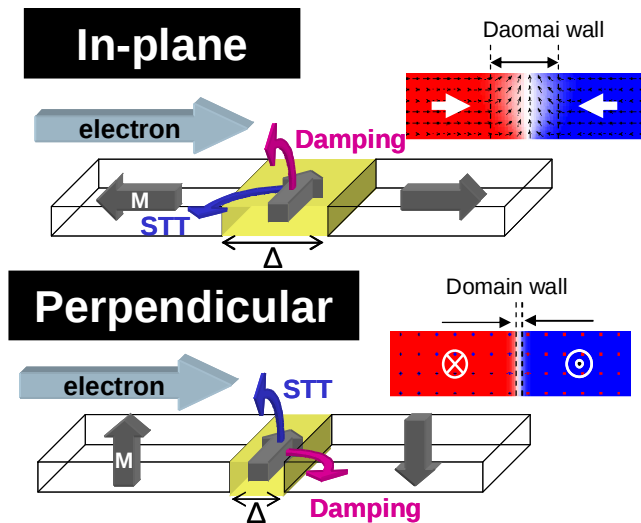
磁壁移動メモリへの適用は困難



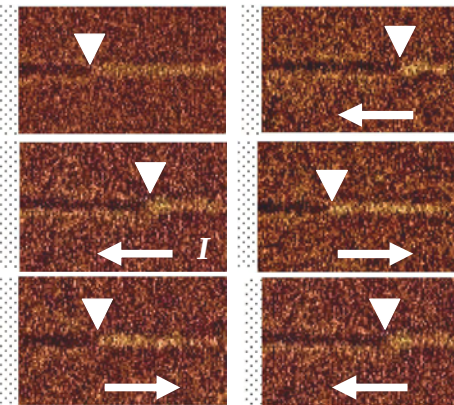
逆走：スピントルクでは
磁壁の動かない方向に動く

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



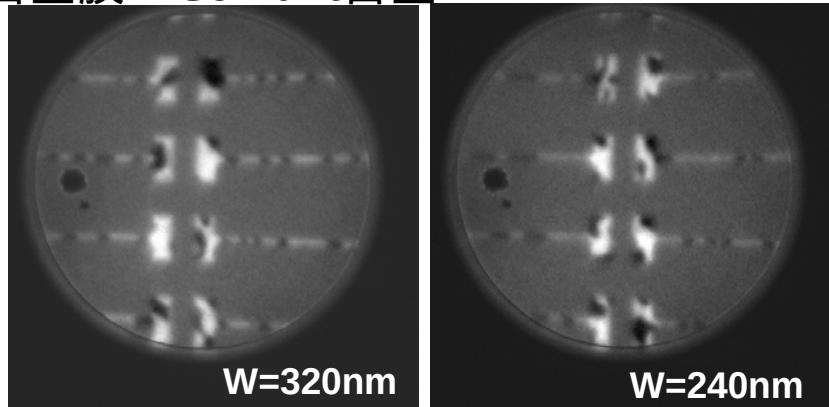
T. Koyama et al.
Appl. Phys. Express 1 (2008) 101303

Co/Ni垂直磁化膜を利用して

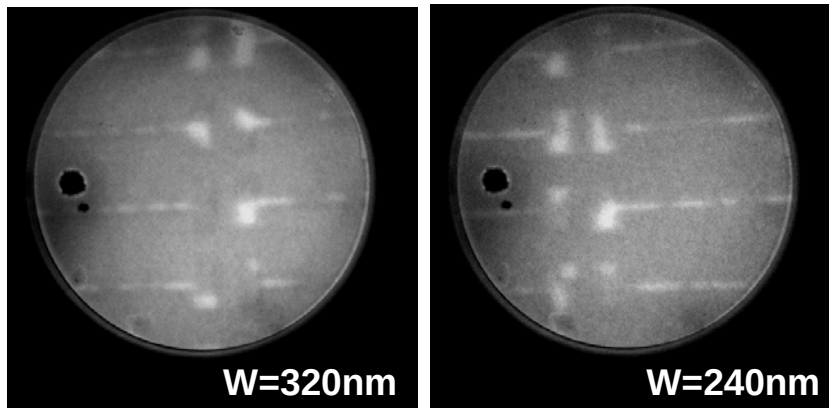
- ・ 磁壁電流駆動の確認
- ・ デバイス動作検証中

例 Co-Pt垂直磁化膜の磁区観察

合金膜 XMCD-PEEM
Co-40Pt合金

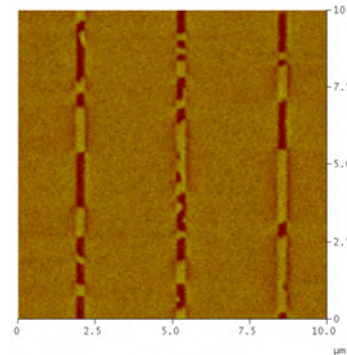


積層膜 [Co(0.7)/Pt(2)]4回積層

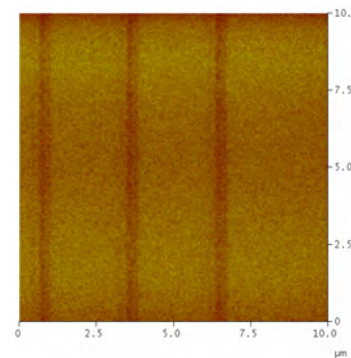


W=240nmまでの細線で磁区観察

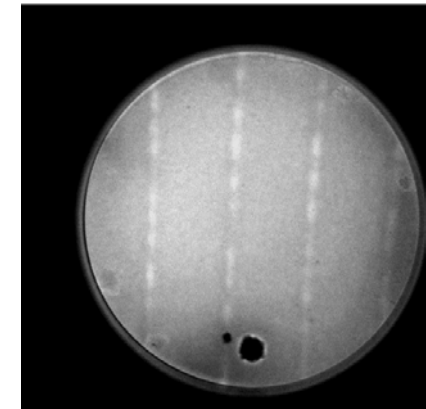
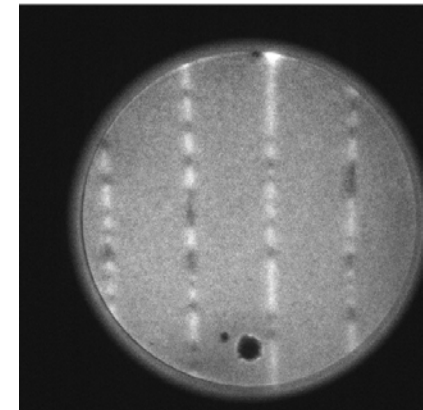
MFM観察



パターン：
 $W=320\text{nm}$ 、 $L=15\mu\text{m}$
成膜、加工時に着磁なし



XMCD-PEEM

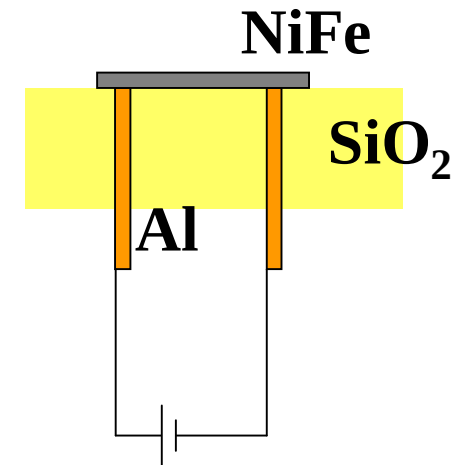
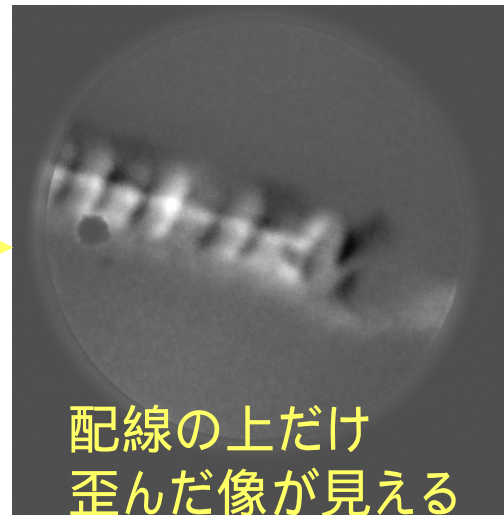
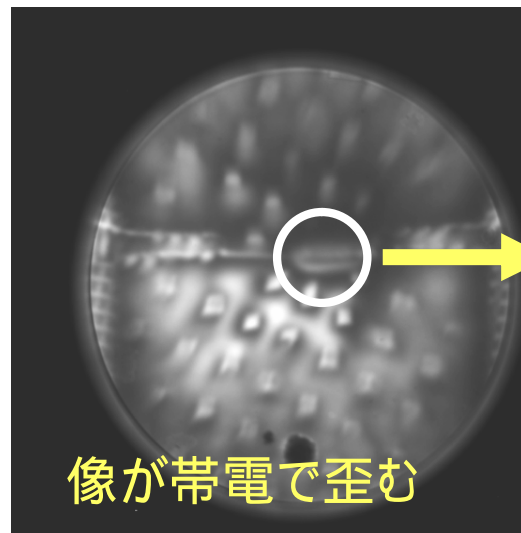


MFMで見えなかった磁区が観察可能
→ 探針による磁区消失

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 → チャージアップで像歪み
電流注入以前に観察困難

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