

実施課題番号 : 2007A1903  
実施課題名 : XMCD-PEEM による次世代 MRAM 素子の磁壁移動観察  
実験責任者所属機関 : 日本電気株式会社デバイスプラットフォーム研究所  
実験責任者氏名 : 大嶋則和 (0018410)  
使用ビームライン : BL25SU

実験結果 : 下記

### XMCD-PEEM による次世代 MRAM 素子の磁壁移動観察

大嶋則和

(日本電気株式会社デバイスプラットフォーム研究所)

#### 【1. はじめに】

われわれはスピン電流による磁壁移動現象のメモリ応用として U 字形状の微小磁性パターンを用いた DW (Domain Wall) Seesaw を提案し、その実証を進めている[1-2]。

DW Seesaw では、U 字形状に形成されたセルに単一磁壁を導入し、これをトラップサイトである U 字の 2 つの角の間で動かして 0,1 状態とすることが書き込み動作となる[1-2]。このため、メモリ動作の検証、あるいは形状等の最適化による性能向上の検討には、磁区を直接観察することが有効である。DW Seesaw セルはサブミクロンサイズ線幅を有する微小磁性体であり、形成される磁壁が磁場の影響を受けやすい。したがって、その観察には高分解能で観察時の磁気的な擾乱のない磁区観察手法が求められる。このような条件を満たす観察手法として X 線磁気円二色性を利用した光電子顕微鏡 (XMCD-PEEM) 法がある。XMCD-PEEM は、分解能が約 100nm と適度に高く、観察時に磁場を利用しない手法であり、また元素選択性を有する測定手段であることから積層膜構造を有する微小磁性体で形成される DW Seesaw セルの観察に適していると考えられる[3]。こうした観点から、われわれは 2006B 期から DW Seesaw セルに用いる U 字形状 NiFe パターンの磁区観察をおこなっている。これまでに、U 字形状パターンが着磁方向に即した磁化配置をとり単一磁壁が U 字の角に導入されること、磁場印加による磁壁移動でトラップサイト間を磁壁が移動するセル、磁壁を消失するセル、トラップサイト間で磁壁が止まるセルといった多様な磁化パターンが形成されることを明らかにしている[4]。この結果は、XMCD-PEEM 観察で磁場駆動による DW Seesaw の基本動作確認ができたこと、また磁場印加にともなう多様な磁区形成というセル構造問題点の抽出が可能であることを示しており、XMCD-PEEM 観察の DW Seesaw 開発への適用が有効であることを現している。

この結果を受け、2007A 期では U 字形状のような多様な磁化配置を形成しない DW Seesaw セルの形を決めるための要因を XMCD-PEEM 観察で調べることにした。ここでは、基本となる従来型の U 字形状と磁化固定領域を従来形状よりも長くした U 字形状、磁化固定層を磁壁移動領域の上下につけた H 字形状の 3 つのパターンを作製して磁壁の磁場移動を観察し、その振る舞いを解析した。その結果、磁化固定領域の長い U 字形状、H 字形状のパターンはいずれもトラップ間磁壁移動が支配的に起こり、単一な磁区構造になることがわかった。本報告ではその結果について記述する。

## 【2. 実験】

### 2-1. 試料

500nm の熱酸化 SiO<sub>2</sub> を形成した Si 基板上に DC マグネトロンスパッタ法で Ta(15nm)/NiFe(10nm)/Ru(20nm)//基板なる構成の磁性膜を作製した。この膜にフォトリソグラフィで DW Seesaw のレジストパターンを形成し、Ar ミリングで磁性体パターンに加工した。形状は、従来型の磁化固定領域長さ 1 $\mu$ m の U 字形状 (U 字形状)、磁化固定層を 2.5 $\mu$ m と長くした U 字形状 (以下、耳長 U 字形状と略す)、H 字形状の 3 種類であり、いずれも細線幅は 320nm である。X 線照射にともなう試料表面のチャージアップを防ぐため、下地層 Ru を数 nm 残してパターンニングをおこなった。試料加工の後、室温で 1kOe の磁場を素子に対して 30° 傾けた方向から印加し、試料の着磁をおこなった。

### 2-2. 観察

磁区観察には大型放射光施設 SPring-8 の BL25SU (軟 X 線分光ビームライン) に設置されている ELMITEC 社製の XMCD-PEEM 装置 PEEMSPECTOR を用いた。試料表面に形成された酸化物を除去する目的で装置の preparation chamber で 900sec の Ar イオンエッチングをおこなった後、Ni L-III ピーク (853.2eV) を測定エネルギーに決めて DW Seesaw パターンを観察した。視野径は 10 $\mu$ m $\phi$ 、25 $\mu$ m $\phi$ とした。

磁場は PEEM 装置内に設置されているコイル (最大約 100Oe) を用いた。約 1msec のパルス状電流をコイルに流して発生する磁場をパターンの磁壁移動領域に平行な方向から与えた。

## 【3. 結果】

Fig.1 に U 字形状、Fig.2 に耳長 U 字形状、Fig.3 に H 字形状の磁場印加前後の磁区像を示す。

まず、従来型である U 字形状の磁区像を見る。2006B 期では線幅 400nm について観察したが、今回は線幅を 320nm と細いものを見ている。これは、XMCD-PEEM がこのサイズの観察に十分な分解能があることと、細線化によって形状異方性が増して磁壁が安定化する可能性があるため、その効果を期待したことによる。Fig.1 (a) に示した白一色の像は初期着磁後の磁区像である。この像から、磁壁移動領域、磁化固定領域いずれも X 線に対して平行方向の磁化成分を有しており、磁化固定領域の磁化が右下、磁壁移動領域の磁化が左下を向き、右下に head-head 磁壁を形成した配置であることがわかる。このパターンに 40Oe の磁場を印加したときの磁壁変化を示したのが Fig.1 (b) である。磁壁移動部分が黒く磁化固定領域の像は白いままのパターンが多く形成されている。これは磁壁が右下のトラップサイトから移動して左上の角に移動した結果、磁化方向が反転したことを現している (図中①)。DW Seesaw の動作を実現できる磁化配置である。また、中には磁壁移動領域が黒く磁化固定領域が白から灰色になる像もある。これは、磁壁が移動し、左上の角のトラップサイトを通り越して磁化固定領域の磁化を反転させた結果、単磁区となり磁壁が消失したものである (②)。更に、磁壁移動領域で黒白が形成されているものは、磁壁がトラップサイトを抜け出したものの移動領域の途中で止まってしまったものである (③)。これに初期状態のまま変化しないもの (④) を加えて 4 つの磁化配置が混在していることがわかる。これは、線幅 400nm の U 字形状パターンに見られた像と同じ結果である。U 字形状パターンでは磁場印加により多様な磁区構造をとってしまうことが再現された。磁場印加方向を逆転したときの磁壁移動の

様子を観察した結果を Fig.1(c) に示す。最初の磁場印加で磁区構造がばらついたのに対応して、磁壁移動を起こすもの、変化のないものが混在した磁区パターンが形成されている。よくみると、最初の磁場印加で移動してトラップサイトに固定された磁壁は、印加磁場の反転により元に戻って白い像となるものが多い (①)。これに対して、磁壁が抜けて単磁区となったものや磁壁が中間位置で停止したものの磁区は変化していない (②、③)。多様な磁区像は磁場印加を繰り返しても変わらないことがわかる。

次いで、耳長 U 字形状パターンの磁区像を見る。Fig.2(a) は、初期着磁後の状態である。U 字形状と同様に白一色のパターンであり、磁化固定領域の磁化が右下、磁壁移動領域の磁化が左下を向き、右下に head-head 磁壁を形成した配置であることを示している。これに磁場を印加した後の像を Fig.2(b) に示す。約 20Oe の磁界で視野中のほとんどのパターン磁壁移動領域の磁化が磁場の方向を向く。磁化固定領域まで変化した素子は視野中ひとつだけである。U 字形状と比較して磁壁移動が一樣に起こること、またトラップサイトに磁壁が固定され易くなったことを現している。磁場を逆転させると、磁壁がトラップサイトを越えて単磁区化するものも見られるが、多くのセルで磁壁がトラップサイト間を移動して初期状態と同じ白い磁区パターンに戻ることがわかる (Fig.2(c))。耳長 U 字形状では、形状による磁化固定領域の磁気異方性を高めることで固定領域の磁化反転を抑制し、磁壁だけが動くように設計している。これが検証されたことを示している。

最後に、H 字形状パターンの磁区像を Fig.3 に示す。初期磁化状態の像が Fig.3(a) である。上記 2 つの形状と同様に白一色のパターンである。磁化固定領域の磁化が右下、磁壁移動領域の磁化が左下を向き、右下に head-head 磁壁を形成した配置である。これに磁場 50Oe を印加した像を Fig.3(b) に示す。ほとんどのパターンで磁壁移動領域だけのコントラストが変化し、磁壁移動による磁化方向の反転が起こっている。磁壁が動かないものもみられているが、磁壁の消失や磁壁移動領域の中間で磁壁が止まった構造はない。耳長 U 字形状同様、磁壁移動が一樣に生じ、またトラップサイトに確実に固定されたことを現している。磁場印加方向を逆転させたときの磁区像を Fig.3(c) に示す。ほとんどのパターンで磁壁が元の位置に戻り、白い像に変化する。耳長 U 字形状よりも元の位置に戻る頻度は高く、DW Seesaw として良好な磁壁移動特性を示している。H 字形状は必ず磁壁が導入される構造になっており、単磁区化はそもそもおこらない。このためトラップサイト間の磁壁移動が安定化されと考えられる。磁壁が元に戻らないパターンは、H 字の右上、左下の 2 つの磁化固定領域と磁壁移動領域で磁化反転し、H 字の角 2 カ所に磁壁を形成している。磁壁を 2 個形成し磁気状態が安定化したため、移動が生じなくなったと考えられる。たとえば磁化固定領域を長くするなどの手法で磁気異方性を更に強くするなど動作を安定にする必要がある。

以上の結果は、磁化固定領域の磁化反転を形状制御により抑制すれば、従来型の U 字形状のような多様な磁化配置を形成せず、トラップサイト間だけで磁壁移動を起こすことができるようになることを示している。磁化固定領域の磁化反転の抑制、特に H 字形状のように単磁区化しない構造で磁化固定領域を安定化することが磁壁移動動作の安定化には有効と考えられる。

#### 【4. まとめ】

DW Seesaw の動作を安定化できるセル形状を探索することを目的として U 字形状、耳長 U 字

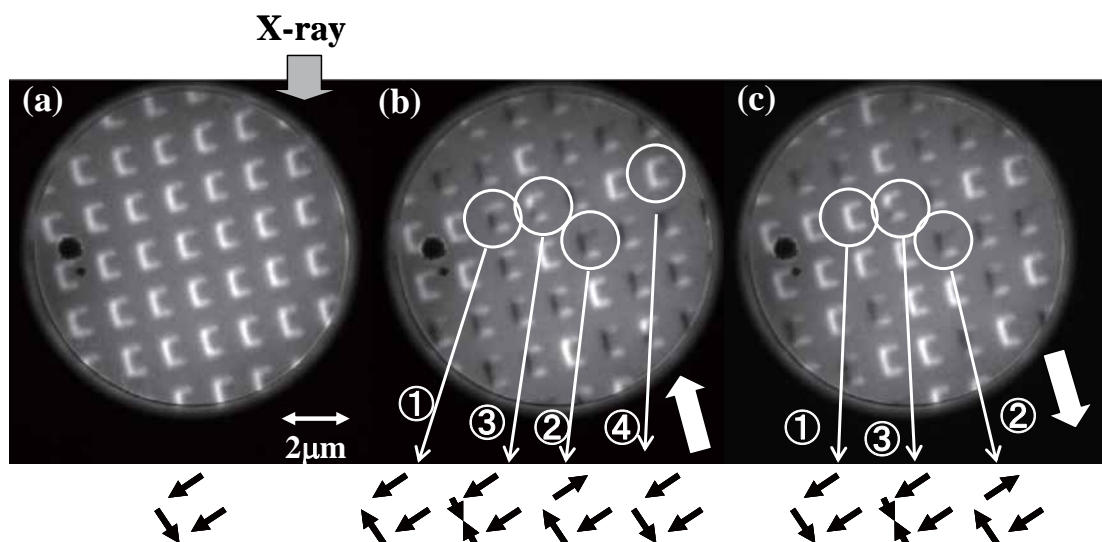
形状、H 字形状について磁場印加前後の XMCD-PEEM による磁区像を観察した。U 字形状では磁場印加にともなって多様な磁化配置を形成したが、磁化固定層を長くした耳長 U 字形状、あるいは磁化固定層を磁壁移動領域の上下につけた H 字形状ではトラップサイト間での磁壁移動が支配的となり、2 値をとりやすい構造となることを確認できた。磁化固定領域の磁化方向を強く固定することで磁壁移動がトラップサイト間内に制限され、DW Seesaw の動作を安定化させることができたと考えられる。形状制御による異方性の増強が有効な手法であることを XMCD-PEEM 観察により確認できた。今後は、スピン電流による DW Seesaw の磁壁移動観察を試みる予定である。

【謝辞】

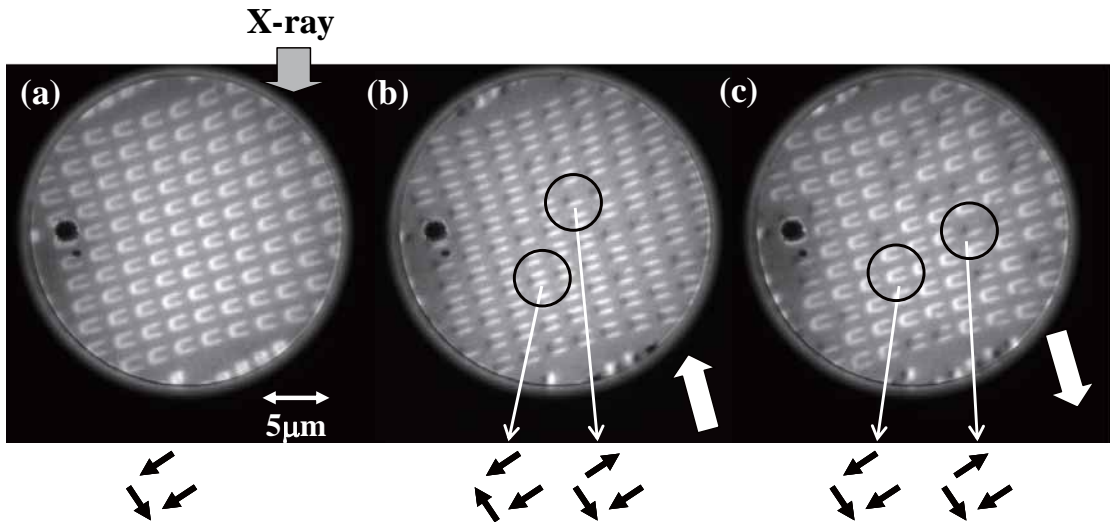
XMCD-PEEM 観察にご協力いただき、議論していただいた SPring-8 福本恵紀氏、課題申請から実験まで有意義な議論をしていただいた SPring-8 木下豊彦氏、中村哲也氏、渡辺義夫氏、NEC（現 JST）泉弘一氏に感謝します。試料の作成、評価などには NEC 五十嵐忠二氏、永原聖万氏、深見俊輔氏、沼田秀昭氏にご協力を得ました。ここに感謝します。この研究は、SPring-8 の重点産業課題（課題番号 2007A1903）として実施されたものです。

【参考文献】

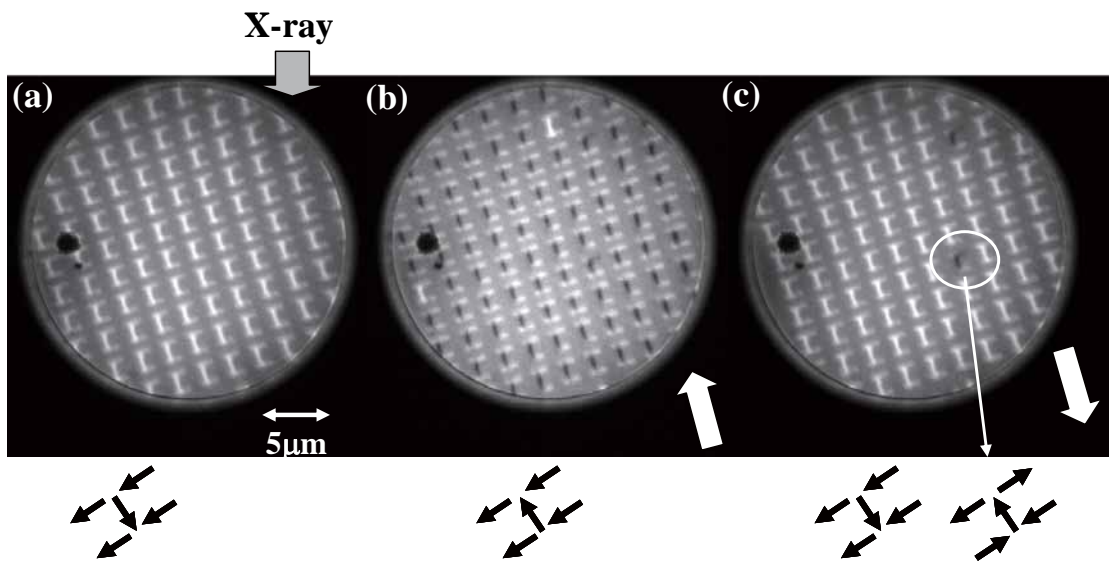
- [1] H. Numata and S. Tahara, Intermag 2006, Technical Digest HQ-03.
- [2] H. Numata, et. al., Tech. Digest of Symposium on VLSI technology 2007, 232.
- [3] たとえば木下豊彦 固体物理 40, 13 (2005).
- [4] 大嶋則和ほか 平成 18 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書 87.



**Fig.1** U字形状パターンのXMCD-PEEM像  
 (a) 初期着磁後、 (b) 磁壁移動領域の磁化と逆向きに磁場印加後、  
 (c) (b)の後、逆向きに磁場印加後



**Fig.2** 耳長U形状パターン of XMCD-PEEM像  
 (a) 初期着磁後、 (b) 磁壁移動領域の磁化と逆向きに磁場印加後、  
 (c) (b)の後、逆向きに磁場印加後



**Fig.3** H形状パターン of XMCD-PEEM像  
 (a) 初期着磁後、 (b) 磁壁移動領域の磁化と逆向きに磁場印加後、  
 (c) (b)の後、逆向きに磁場印加後