

ナノテクノロジーへの新しい応用
東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻
尾嶋 正治、小野寛太、組頭広志

1. はじめに

「もの作りからナノ作りへ」と言われるように、今や物質科学の研究にナノテクノロジーは必須である。電子デバイス、光デバイス、磁気デバイス（図1）の開発において、電子線露光=>エッチングを用いたトップダウン的ナノテクノロジーとともに、自己組織化を利用したボトムアップ的ナノテクノロジーが注目されつつある。具体的には、電子・正孔をナノ空間（ドット、細線など）に閉じ込めた半導体レーザー、Si島を用いた単電子トランジスター、パターンドメディアを用いた磁気ディスク媒体など、自己組織化的に作ったナノ結晶が注目を集めている。また、ULSI用極薄ゲート絶縁膜やトンネル磁気抵抗効果(TMR)磁気ヘッドなどでは3原子層程度の絶縁膜を介した電界効果やトンネル電流制御が行われており、サブナノ領域の界面制御技術がますます重要になっている。

これらのナノテクノロジーの研究に放射光が大きな役割を果たしている。本講演では、高い空間分解能を持った光電子顕微鏡（PEEM）が磁気デバイスの開発にどのように役立つか、またコンビナトリアル的放射光分光解析の重要性、について紹介する。

2. 円偏光放射光を用いた MCD-PEEM

高い空間分解能で光電子イメージを撮影する手法は、放射光ビームを集光させて試料を走査する scanning 型と、試料から放出される光電子をレンズ系で拡大投影する projection 型に大別されるが、放射光のエネルギー可変性、空間分解能、動画撮影、などの点で優れている projection 方式の PEEM に注目が集まっている。放出される光電子のエネルギー分析を行うことによって、数 100meV のエネルギー分解能で微小領域の光電子スペクトルを測定することも可能になっている。しかし、最も特徴的な PEEM 利用法は、磁気円二色性(MCD)を活用した磁気構造のイメージングであろう。PEEM を用いた磁気イメージングは、MFM や spin-SEM に比べて、1) 元素選択性、2) 磁気光学総和則を使った軌道成分とスピン成分の分離、3) 直線偏光を使った MLD-PEEM による反強磁性体中磁区観察、などの特徴を持つ。

図2は FIB(focused ion beam)で形成したパーマロイの微小パターン(25 μ m 角)に円偏光放射光を照射して、2次電子イメージを撮影したもので、円偏光放射光の向きと平行な磁化モーメントを持っている領域が明るくなり、逆方向に磁化した領域が暗くなっている。すなわち、四角形内に閉じた磁区構造となっている。我々はこの形状

を三角、六角、円、リング状と変えて、磁区構造の観察を行っているが、円形ドットの場合に明瞭な vortex が形成されることが判った。この vortex の chirality が今後重要になってくると思われる。すなわち、図 3 に示す MRAM(magnetic random access memory)の構成要素である spin valve memory cell は、その磁気構造のシミュレーション(図 4)から判るように、サブ μm 領域の強磁性層内に vortex が生成し、磁化異常が発生してメモリーの switching 磁界がばらついてしまう。また、MRAM や TMR ヘッドは free 層/バリア層/参照層/反強磁性ピン止め層という構造を取るが、矩形セルでは S 型、C 型という 2 つの磁区構造をとるために、やはり switching 磁界のばらつきが生じる。これを防ぐために検討されているのが図 5 の円形セルで、vortex の chirality (右周りと左周り)を制御することにより、理想的な TMR ヘッド、MRAM セルが構成出来る。そのためには磁区構造の観察が不可欠である。新庄らは MFM で vortex を観察し、vortex の polarization を議論している(Science,2000 年)が、vortex 中 chirality は MCD-PEEM でないと観察出来ない。我々は LLG 方程式を用いたマイクロ磁気シミュレーションを行い、図 6 のような vortex 構造の磁場印加による動的変化を調べている。

さらに高空間分解能の MCD/MLD-PEEM を行うには、数 μm 程度に集光した高フラックスの円/直線偏光放射光を観察領域に照射し、放出される光電子を色収差や球面収差なく結像させることが必要である。

3. コンビナトリアル光電子分光

真にブレークスルーとなる新しいナノ構造を創製するためには、組成などを系統的に変えた試料を高速に作り、その電子状態を高速に測定し、膨大なデータの中から重要な情報を迅速に抽出する informatics 的処理を行うことが求められている。我々はその第一歩としてコンビナトリアル PLD(pulsed laser deposition)装置と SES100 アナライザーを組み合わせたシステム(図 7)を開発し、BL-1C, 2C で実験を行っている。Sr 添加とともに LSMO 価電子帯の e_g 軌道にホールがドーピングされていく様子(図 8)が明瞭に観察されている。講演では高速測定によって何が可能になるかを議論する。

4. 今後の展望

幅広いエネルギー領域(遷移金属元素、希土類元素)で MCD/MLD-PEEM 観察出来るように、偏光可変アンジュレータビームラインを PEEM 専用で建設して頂きたい。それによって、ナノサイエンス/テクノロジーへ大きな貢献が期待出来、動的観察を含めたマイクロ解析の展望がさらに広がる。

【参考文献】1. 小野、木下、尾嶋、表面科学 Vol. 23, No. 5, 300 (2002).

2. 小野、秋永、尾嶋、応用磁気学会誌解説投稿中 3. H. Kumigashira *et al.*, Appl. Phys. Lett. Submitted.

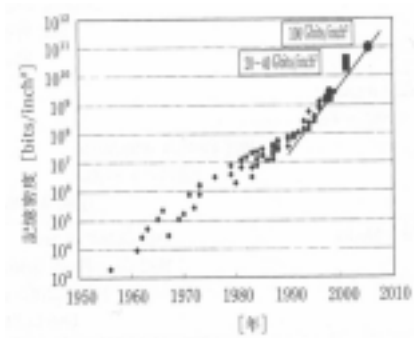


図1 磁気ディスクの進歩

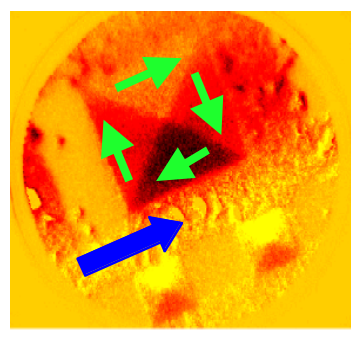


図2 パーマロイパターンのMCD-PEEM像

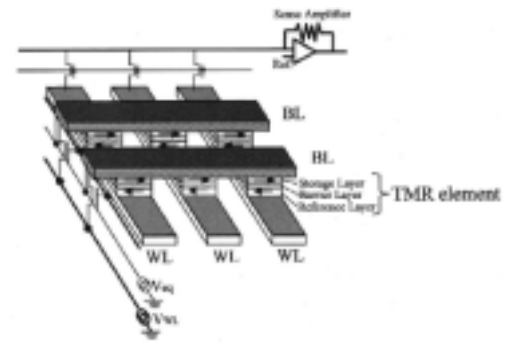
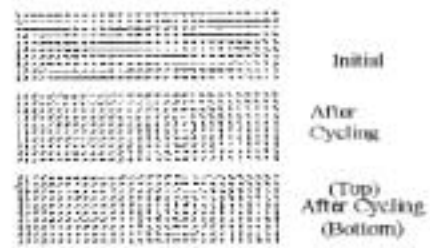


図3 MRAM セル構造



J-O Zhu and Y. Zheng, Characteristics of AP Bias in Spin Valve Memory Elements, IEEE Trans. Mag. 1998

Figure 12. Simulated Spin Valve Memory Cell Anomaly.

図4 MRAM セル内磁化異常シミュレーション

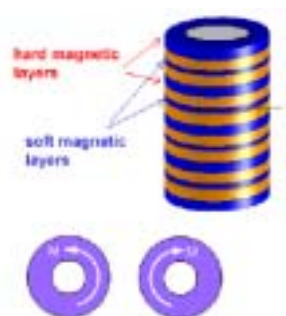


図5 リング型磁気メモリーセル

Landau-Lifshitz equation

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma M \times H_{eff} - \frac{\gamma\alpha}{M_s} M \times (M \times H_{eff})$$

γ: ジャイロ磁気定数
α: ダンピング定数

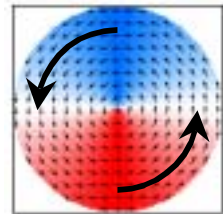


図6 円形ドットのマイクロ磁気シミュレーション

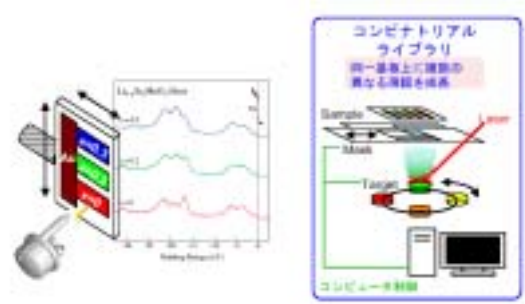


図7 コンビナトリアル薄膜作製 + 光電子分光

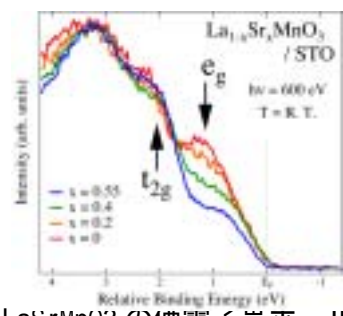


図8 LaSrMnO3 の価電子帯ホールドープ