

スピン偏極パルスTEMの開発とナノスピン解析への応用

Development of the spin polarization pulsed EM,
and application to nano-spin analysis

田中 信夫 (TANAKA NOBUO)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授



研究の概要

次世代磁気デバイス開発の鍵となるナノスピン解析用のスピン偏極TEMを開発し、磁気量子ドット内のスピン状態の高分解能観察をはじめ、ナノ磁性に関する先端的研究をする。

このためにスピン偏極TEMを、電子銃開発、スピン回転器・注入器、磁場印加試料ホルダー、磁気散乱理論の開発項目などに分けて進め、かつその応用研究を5年間で実施する。

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ナノ構造科学

キーワード：電子顕微鏡・スピントロニクス・量子ビーム

1. 研究開始当初の背景

近年の磁気記録装置の高密度化への過酷な要求は、磁気記録単位を5nm以下にすることを必須とし、それに対応する磁気量子ドットの歩止まりの高い製造とその磁気状態の正確な評価を要求している。TEMで磁性状態の観察を行う方法の一つとして、スピン偏極電子ビームの利用が考えられる。近年、名古屋大学において、GaAs半導体歪超格子構造をベースとした高性能フォトカソードが開発され、90%のスピン偏極度とLaB₆熱電子源よりもさらに一桁高い輝度 $1.0 \times 10^7 \text{ A m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ V}^{-1}$ をすでに実現している。

2. 研究の目的

スピン偏極電子線を用いた高分解能TEMを世界で初めて開発する。それを用いて次世代大容量HDD用に開発するFePtなどのナノサイズ磁気量子ドットのスピン構造やトンネル磁気抵抗(TMR)素子内の磁化反転現象を精緻に研究する。さらに分解能が1nm以下に達した段階で、各種スピントロニクスデバイスの素子性能を支配する界面スピン

構造を原子レベルで可視化し、新しいナノスピン解析技術の開発に役立てることも目的としている。

3. 研究の方法

本研究は世界で初めての装置開発と測定実験を含むため、以下の5年間の計画で研究を進める。本研究はこれを次の7つの部分に分割して、綿密な研究開発設計をしている。

それぞれの内容は、(1)高輝度・高偏極度フォトカソード開発、(2)30-50keVのTEM用偏極電子銃の開発(図1, 2参照)、(3)スピン回転器およびTEMへの入射最適化設計および装置開発、(4)光または磁場、電場励起用試料ホルダー部および対物レンズ部の開発、(5)偏極電子による像の高感度・高精度記録法、および磁気状態を取り出す画像処理装置の開発、(6)種々の磁性関係薄膜、ナノワイヤ微粒子の作製法の開発と観察、(7)電子のスピンによる磁気ポテンシャルによる電子線の散乱の理論的研究である。最終的にこれらを統合し、スピン偏極電子線を用いた高分解能スピン構造観察を実現する。

4. これまでの成果

TEM用に50keV偏極電子源の設計・作製を行い、スピン偏極電子線の発生に成功した。また、この成功によりスピン偏極電子線をTEMへ注入することを可能にした。全体計画の心臓部である本開発は、計画通りに成功した。また、新たにスピン回転器の設計製作を行い、電子スピンの制御を行うことを可能にした。また、照射系についても新規にダブルギャップレンズを開発し、スピン方向を正確に制御しながら試料に照射することを可能にした。

一方、スピン偏極電子銃用・背面照射型フォトカソードの開発では、GaAs-GaAsP歪み超格子を活性層に使用しつつ、中間層をAlGaAsに変える等の工夫を施すことにより向上を図った。結果、偏極度90%を保ったまま量子効率を0.4%へと従来型の4倍に向上することに成功した。これにより、顕微鏡における輝度の向上、長期安定動作を可能にする重要な成果を得た。

また、これら新規に開発したスピン偏極電子銃とスピン回転器を含む照射系ならびにTEM本体の結合に成功し、さらに、スピン偏極電子線をスピン回転器、CL、TEM本体、そして観察室まで輸送することに成功した。本内容は平成24年度の前半に実施されるべき内容であり、当初計画より早く進んでいる。

5. 今後の計画

電氣的安定性を 10^{-6} に、真空度を 10^{-7} Paに、また差動排気系をより多段にした電圧可変20kV-100kVのTEMにスピン偏極電子銃を取り付ける。その後、透過電子回折図形や像をスピンごとに画像処理してスピン依存散乱過程を抽出する。

磁性ドット試料に電子顕微鏡のレンズに必要な強磁場をかけないために、レンズギャ

ップ付近の磁場をミリガウスオーダーにしたローレンツレンズも用いる。これにより、スピン偏極電子銃から取り出した高スピン偏極電子をFe-Pt量子ドットやハーフメタルナノ積層構造にパルス注入することにより、磁場を用いないスピン注入磁化反転ダイナミクスをスピン偏極TEMで観察する。また、スピン偏極TEMを用いて各種ナノ構造磁性体のスピン構造解析を行う。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. M. Kuwahara, et al., *Journal of Physics: Conference Series*, 掲載確定
2. N. Sugimoto, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, (2012) accepted.
3. Koh Saitoh, et al., *Journal of Electron Microscopy*, (2012) doi: 10.1093/jmicro/dfs036.
4. S. Morishita, J. Yamasaki, and N. Tanaka, *Journal of Electron Microscopy*, 60(2) (2011) 101-108
5. N. Fukatani, K. Ueda and H. Asano, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **109** (2011) 073911-1-6.
6. T. Miyawaki, et al., *IEEE Trans. on Mag.*, **47** (2011) 2643-2645.
7. H. Matsushima, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** (2011) 103004-1-5.
8. S. Inamoto, et al., *Philosophical Magazine Letters*, 91(9) (2011) 632-639.
9. Y. Ishibashi, et al., *Philosophical Magazine Letters*, 91 (2011) 2519-2527.
10. M. Kuwahara, et al., *Journal of Physics: Conference Series*, 298 (2011) 012016.
11. R. A. Herring, et al., *Journal of Electron Microscopy*.
12. K. Yoshida, et al., *Microscopy and Microanalysis*, 17 (2011) 264-273.

ホームページ等

<http://sirius.cirse.nagoya-u.ac.jp/>