

論文の内容の要旨

論文題目 ガーネット薄膜における静的・動的磁区構造の制御と ナノ磁気構造へと展開する要素研究

氏名 久保田 将司

第1章 序論

近年、ネットワークインフラの多様化とともに、あらゆる端末にメモリが搭載されるようになり、メモリの市場が拡大している。そのニーズに答えるべく、大容量、高速、低消費電力等の性能を兼ね備えた理想的なメモリの開発が待たれている。半導体エレクトロニクスにおける微細化によるメモリの高性能化は既に限界を迎えつつあり、従来の微細化とは異なるアプローチが必要となっている。その例として、電子のスピン自由度を利用したスピントロニクスが挙げられる。近年、スピンの渦巻き状に配列した「スキルミオン」が発見され、そのナノスケールの粒子のメモリへの応用に期待が集まっている。本論文の目的は、ガーネット薄膜における静的・動的磁区構造制御とナノ磁気構造へと展開する要素研究を通じ、スキルミオンを利用したエレクトロニクス、「スキルミオニクス」の実現へ向けた基盤技術確立することである。

本研究では、トポロジーの観点からはスキルミオンとみなせる磁気バブル及びスキルミオンを研究対象とし、メモリへの応用を見据え、書き込み、読み込み、転送、速度検出といったスキルミオンの制御手法の確立と提案を行った。実験方法を記述した第2章に続く、第3章から第8章はメモリの機能の要素動作として、書き込み、読み込み、転送、速度検出のテーマに分類している。書き込みのテーマでは、応力による新しい書き込み方法の探索を行った。3章では、磁気バブル材料であるガーネット薄膜において、エピタキシャル歪による磁気異方性の制御を行った。さらにその結果より知見を得て、4章では局所応力による磁区構造の制御を目指した。読み込みのテーマでは、スキルミオンの電氣的検出方法の検討と微小ホール素子の作製を行った。5章ではガーネット薄膜上に微小 Bi ホール素子を積層し、磁壁動作の検出を行った。6章では Bi ホール素子の特性をもとにスキルミオンの検出可能性について検討し、FeGe マイクロサンプル上への Bi ホール素子の試作を行った。転送のテーマでは、スキルミオンの細線転送路の作製を行った。7章では、FeGe 薄膜の微細加工を行い、細線中でのスキルミオンの挙動について調査した。速度検出のテーマでは、スキルミオンのリアルタイムイメージングへ向けての技術確立を行った。8章では、Fe_{0.5}Co_{0.5}Si マイクロサンプルを作製し、スキルミオンの軟 X 線散乱による検出を行った。

第3章 磁性薄膜における磁気異方性の制御

磁気構造の外場による制御として「応力」に着目し、磁性ガーネット薄膜における磁気異方性のエピタキシャル歪みによる制御を試みた。3.2節では、エピタキシャル歪が約 50 nm 厚の $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の磁気異方性に与える影響を調査した。歪み量を変化させるためのアプローチとして、① 格子定数差の異なる 2 種類の基板 ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 及び $(\text{CaGd})_3(\text{MgGaZr})_5\text{O}_{12}$ (SGGG)), ② 製膜中の酸素条件の変更による Fe 欠損に起因する $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の格子の膨張, を利用した。これらによって、面内歪量 $\varepsilon_{//}$ を -0.97 から $+0.94\%$ 、面内応力 $\sigma_{//}$ を -2.75 から $+2.65\text{GPa}$ まで変化させた。これは応力誘導磁気異方性 H_A を -20kOe から $+20\text{kOe}$ まで変化させたことに相当する。 H_A の増加により面直磁化成分の増加傾向が見られたものの、最も H_A の大きい SGGG 基板上的ストイキオメトリの $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜においても面直と面内磁化成分が同等レベルの特性しか得られなかった。その原因として、約 50nm の薄膜において 20kOe に相当する形状異方性磁場が存在すると考えた。

3.3節では、磁気異方性を制御するために応力誘導磁気異方性を利用した材料設計を行った。 H_A を変化させるためのアプローチとして、① $\text{RE}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (RE は希土類)の希土類組成の変化による磁歪定数、格子定数等の物性値の変化、② 格子定数差の異なる基板, を利用した。その結果、 $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{GGG}$ において $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{SGGG}$ と同程度の H_A が得られることが分かった。さらに、 $\text{Sm}_{3-x}\text{Tm}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ において、小さい格子定数の変化に対して、応力誘導異方性磁場を大きく変化させられることが分かった。

3.4節では、 H_A を大きく変化させられる $\text{Sm}_{3-x}\text{Tm}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ を用いて磁気異方性の制御を行った。垂直と面内方向の磁化の比 $M_{\perp}/M_{//}$ が基板や薄膜の組成を問わずに H_A に対してスケールすることが分かった。コヒーレント成長を維持するために小さい歪量 ($\varepsilon_{//}=+0.49\%$) で H_A を大きく ($H_A=+25\text{kOe}$) できる GGG 基板上 $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜において垂直磁化膜を得ることができた。また $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の膜厚依存性の結果より、磁区幅 W が膜厚 t の減少より、スケール則 $W \propto t^{1/2}$ に従って減少することを確認した。

第4章 磁性薄膜における局所応力による磁壁の制御

3 章にて磁性ガーネット薄膜における磁気異方性をエピタキシャル歪によって制御できることから着想を得、本章では局所応力による微細磁気構造の制御を試みた。

4.2節では、局所応力による微細磁気構造の制御の実験に用いる試料の磁気異方性の制御を行った。磁気異方性を変化させるためのアプローチとして、液相エピタキシー法により作製された $(\text{Gd}_{1.63}\text{Tb}_{0.33}\text{Ca}_{0.04}\text{Bi}_{1.00})(\text{Fe}_{4.66}\text{Al}_{0.34})\text{O}_{12}$ を用い、本製法において発現する成長誘導磁気異方性が熱処理によって低減する現象を利用した。熱処理温度の増加に従って磁気異方性を低減することができ、磁気バブルの安定領域を拡大できることが分かった。

4.3 節では、磁気異方性を系統的に変化させた試料を用い、磁壁の局所応力による制御を行った。試料を押すという動作により、磁性体中の磁壁を動かす、切断する、磁気バブルを発生させる、といった現象を発生させられることを発見した、さらに、外部磁場によってこれらの現象に、揮発性、不揮発性のいずれかを付与するかを任意に選択できることを発見した。このような現象が、磁気双極子相互作用、磁壁エネルギー、ゼーマンエネルギーの均衡によって発現することを理論計算と実験の双方によって明らかにした。

第5章 磁壁動作の電氣的検出

スキルミオンの動作の電氣的検出を念頭に微小 Bi ホール素子を作製し、磁性ガーネット薄膜における磁壁動作の電氣的検出を試みた。

5.2 節では、磁性ガーネット薄膜上へ電子線リソグラフィとリフトオフ法により Bi 微小ホール素子の作製を行った。作製したホール素子の 300 K におけるホール係数 R_H 、積感度 K_H 、直列抵抗 R_S はそれぞれ $-0.44 \text{ cm}^3/\text{C}$ 、 $4.4 \text{ V}/(\text{A}\cdot\text{T})$ 、 $1.7 \text{ k}\Omega$ と従来の報告例と比較して高積感度かつ低入力抵抗であることを確認した。

5.3 節では、作製した微小 Bi ホール素子を用いてガーネットの磁壁動作の検出を行った。外部磁場によって磁壁を動作させ、磁壁がホールクロスバーの直下を横切った際にホール電圧の正負のスイッチングすることを確認した。出力ホール電圧は、ホール素子の特性と浮遊磁場からの計算値とほぼ一致した。

第6章 スキルミオンの電氣的検出

6.1 節では、スキルミオンの電氣的検出の検討を行い、FeGe におけるスキルミオンの微小 Bi ホール素子による検出可能性についての見積もりを行った。FeGe 上へ 30 nm の絶縁膜を介してホール素子を積層したと想定すると、スキルミオンの中心と淵とで磁場 $B=\pm 3.5 \text{ mT}$ のスイッチングが期待できることが分かった。5 章で作製したホール素子の特性から計算すると、極低温から室温において 20 以上の S/N 比が期待できることが分かった。

6.2 節では、スキルミオンの電氣的検出のための試料構造を考案し、FeGe マイクロサンプル上への微小 Bi ホール素子の作製を行った。マイクロサンプル上への $50\times 50 \text{ nm}$ の Bi ホールクロスバーを作製可能であることを確認した。

第7章 スキルミオンの細線転送路の作製

スキルミオンの細線転送路での安定性・挙動についての知見を得るため、(111)面 Si 基板上 FeGe 薄膜に対し微細加工を行った。スキルミオン直径 70nm に対し、スキルミオン直径よりも小さい線幅 30nm から十分大きい線幅 $10\mu\text{m}$ のホールバーを作製した。線幅 $10\mu\text{m}$ と

線幅 100nm の比較したところ、いずれの試料においてもスキルミオンの存在を示唆するトポロジカルホール効果が観測された。この結果より、単一のスキルミオンに相当する転送路に閉じ込めた場合にも、スキルミオンは安定に存在し得ることが示唆された。また、線幅 100nm の試料ではトポロジカルホール効果が増大し、かつ、ホール抵抗が磁場に対して不連続的に変化する現象が見られた。

第8章 スキルミオンの軟 X 線散乱による検出

スキルミオンの動的観察を目標とし、軟 X 線ホログラフィーによるリアルタイムイメージングのための技術開発を行った。そのための試料構造の提案・作製を行い、目標に対するマイルストーンとなる、スキルミオンの軟 X 線散乱による検出・同手法での磁気相図の作成に成功した。

8.1 節では、軟 X 線ホログラフィーのため、貫通穴および通電用のリードパターン付きの Si 基板を作製し、その上にマイクロサンプリングしたスキルミオン母体材料 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ をマウントする、という試料構造を提案した。

8.2 節では、軟 X 線ホログラフィーの事前実験として行った、スキルミオンの軟 X 線散乱による検出のための試料構造の作製を行った。

8.3 節では、作製した試料を用い、軟 X 線吸収スペクトルの測定を行った。室温および転移温度付近である 30K のいずれの温度においても、Fe による吸収が観測された。Fe の共鳴エネルギーにおける軟 X 線磁気散乱像より、特定の磁場と温度領域においてスキルミオンを反映する構造が観測された。